

Anhänge zu:

## Zur Ermittlung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas am Beispiel eines Glasbogens mit Zugstab

1. Statik für den Glasbogen mit Zugstab als Überkopfverglasung
2. Untersuchung des Tragvermögens von PVB-Folie in VSG-Scheiben nach einer Schubverformung
3. Untersuchung des E-Moduls der PVB-Folie im Dauerzugversuch
4. Untersuchung des E-Moduls von gebrochenem VSG im Dauerzugversuch
5. Untersuchung der Biegesteifigkeit des gebrochenen VSG mit Biegeversuchen
6. Ermittlung der Reibung zwischen gebrochenem VSG und Stahl bzw. gebrochenem VSG und Neopren anhand von Reibungsversuchen
7. Berechnung der Resttragfähigkeit
8. Lebenslauf



## Anhang 1

Statik für den Glasbogen mit Zugstab als  
Überkopfverglasung

## Inhaltsverzeichnis

1	Gegenstand der Statik .....	3
2	Verhalten der PVB-Folie .....	4
3	Herstellung des Bogenglases .....	6
4	Vorgaben der Berechnung.....	7
4.1	Geometrie und Materialien.....	7
4.2	Sicherheitskonzept, Sicherheitsbeiwerte und Materialkennwerte .....	8
4.3	Toleranzen .....	9
4.4	Vorspannung durch Krümmung der Scheiben .....	10
4.5	Äußere Beanspruchungen .....	10
4.6	Beanspruchung aus der Resttragfähigkeit.....	11
5	Vorgehen bei der Berechnung am Beispiel der Bogenglasscheibe mit 2 x 12mm Stärke .....	11
5.1	Materialeigenschaften, FE-Modell, und Auflagerbedingungen .....	13
5.2	Berechnung des Herstellungsprozesses .....	16
5.3	Berechnung der maßgebenden Lastfälle und Nachweise der Glasscheibe .....	18
5.3.1	Ermittlung der Knicklast .....	18
5.3.2	Nachweis der Volllast.....	19
5.3.3	Nachweis der halbseitigen Last .....	21
5.3.4	Nachweis der abhebenden Last .....	22
5.3.5	Nachweis des Schubwinkels am Glasrand .....	23
5.4	Zugstäbe .....	24
5.5	Glashalter.....	25
5.6	Unterkonstruktion .....	27
5.6.1	Erforderliches Lagerspiel aus den Regellastfällen .....	27
5.6.2	Erforderliches Lagerspiel und Beanspruchung der Unterkonstruktion aus dem Lastfall Resttragfähigkeit .....	28
5.6.3	Festlegung des Lagerspiels .....	30
5.7	Minimale Spannweite .....	30
5.8	Berechnung der Bögen mit Glasstärken von 2 mal 10mm, 2 mal 8mm, 2 mal 6mm, 2 mal 5mm, und 2 mal 4mm.....	31
6	Literatur.....	35

## 1 Gegenstand der Statik

Das Bauelement Bogenglas wird von der Firma Maier-Glas in Heidenheim hergestellt. Das Prinzip dieser Bogenglaselemente beruht auf einer ebenen Glasscheibe, die in Bogenform gezwungen und mit Rundstahlstäben fixiert wird. Diese sind an beiden Enden durch Glashalter mit der Scheibe verbunden, welche das Glas an der Scheibenkante umgreifen. So entsteht ein innerlich statisch unbestimmtes System mit einem entsprechenden Vorspannungszustand. Ohne äußere Lasten erhält der Rundstahl Zug- und das Glas Druck- und Biegebeanspruchung. Das Prinzip dieser Bauelemente wurde von der Firma Maier-Glas unter der Bezeichnung Bogenglas patentiert.

Gegenstand der vorliegenden Statik ist die Ermittlung der maximalen Spannweite für Bogenglas, das als Überkopfverglasung verwendet wird. Die Glasstärke des Bogenglases variiert dabei. Es wird Verbundsicherheitsglas (VSG) aus zwei Einscheibensicherheitsgläsern (ESG) und einer Polyvinylbutyral (PVB) – Folie als Zwischenschicht verwendet.

Im Vergleich zu der flachen Glasscheibe weist das Bogenglas gegenüber äußeren, gleichmäßig verteilten Lasten (Eigengewicht, Schnee, Wind) eine wesentlich höhere Tragfähigkeit auf. Die Lasten werden in der Hauptsache durch Normalkräfte im Bogen und in den Zugstäben abgetragen. So können selbst große Spannweiten mit dünnen Glasscheiben überbrückt werden.

Die Vorteile der Bogenglaselemente lassen sich in den folgenden Punkten zusammenfassen:

- Hohe Tragfähigkeit des Glases in Bogenform bei flächig verteilten Lasten (Eigengewicht, Schnee, Wind) da die Beanspruchungen überwiegend durch Normalkräfte statt durch Biegung abgetragen werden.
- Bei gegebener Spannweite können die Dicke der Glasscheibe und damit die Kosten reduziert werden.
- Günstige Herstellung der Glaselemente, da planmäßig ebene Scheiben verwendet werden, die in die Bogenform gezwungen werden.
- Einfache Montage der Glaselemente, da die Elemente werksmäßig gebogen und mit den Rundstählen ausgestattet werden. Auf der Baustelle können sie ohne weiteren Aufwand einfach versetzt werden.
- Die unbegrenzte Reihung der Elemente in Bogenlängs- und Bogenquerrichtung ist möglich.

Bogenglaselemente wurden bei der Loggia in Aalen-Wasseralfingen und beim zentralen Omnibushof in Heidenheim verwendet. In den Veröffentlichungen [Stumpf; 2002],

[Breuninger, Stumpf, Fahlbusch; 2003] und [Breuninger, Stumpf; 2004] wurden diese Projekte sowie die Vorteile und Eigenheiten dieser Bauelemente eingehend beschrieben.

Zum Verständnis der im weiteren vorausgesetzten Annahmen wird in Kapitel 2 das Verhalten der thermoplastischen PVB-Folie erläutert.

## 2 Verhalten der PVB-Folie

Im Gegensatz zu monolithischen Glasscheiben kann das Tragverhalten von VSG-Scheiben aufgrund ihrer Zwischenschicht aus PVB-Folie nicht mit linear elastischen Ansätzen beschrieben werden. Die PVB-Folie weist sowohl ein zeit- als auch temperaturabhängiges Verhalten auf.

Ohne an dieser Stelle auf die chemischen und physikalischen Zusammenhänge näher einzugehen, kann nach Bild 1 das Schubverhalten der PVB-Folie in Abhängigkeit von der Temperatur grob in drei Bereiche eingeteilt werden:

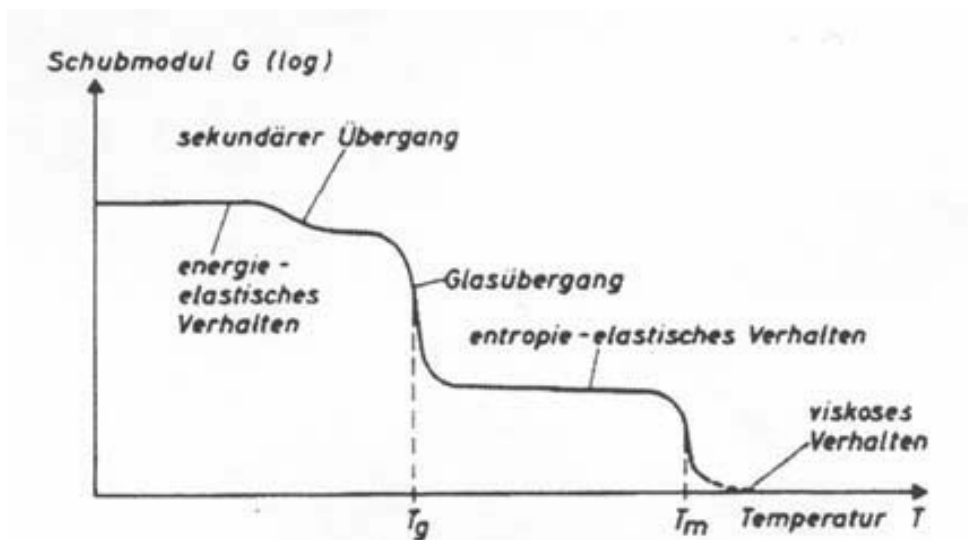


Bild 1: Verformungsverhalten von PVB nach [Wesche; 1988]

Bei tiefen Temperaturen bis ca.  $10^{\circ}\text{C}$  ist das thermoplastische PVB im energieelastischen Bereich, d.h. es ist hart elastisch. Zwischen ca.  $10^{\circ}\text{C}$  und  $20^{\circ}\text{C}$  befindet sich der Bereich der Glasübergangstemperatur  $T_g$ . Das Gefüge des PVB weicht auf und ändert sein Verhalten von hart elastisch zu gummi- oder entropieelastisch. Mit zunehmender Temperatur verringert sich bei PVB der Schubmodul im gummi-elastischen Bereich. Ab ca.  $60^{\circ}\text{C}$  beginnt das PVB zu erweichen. Das gummielastische Verhalten nimmt stark ab und das PVB wird zunehmend plastisch viskos. Dieses Erweichen verstärkt sich mit zunehmender Temperatur bis zu der Schmelztemperatur  $T_m$ .

Diese Eigenschaften der PVB-Folie werden bei der Herstellung und beim Tragverhalten der gebogenen Glaselemente gezielt ausgenutzt.

Die VSG-Scheiben werden bei einer Temperatur von 60°C gebogen. Der geringe Schubmodul der PVB-Folie im VSG führt zu vernachlässigbarer Verbundwirkung und damit zu verringerter Beanspruchung der Gläser bei der Fertigung.

Bei tiefen Temperaturen erhöht sich die Steifigkeit der PVB-Folie und damit auch die Steifigkeit und Stabilität des Bogens im maßgebenden Lastfall Schnee.

Es wird klar, dass für die Dimensionierung der Glaselemente zwei Gegebenheiten von Bedeutung sind:

1. das Schubverhalten der PVB-Folie beim Fertigen der Elemente
2. das Schubverhalten der PVB-Folie bei Schneeeinwirkung

Ad 1: Beim Herstellen der gebogenen Glaselemente entstehen Druck- und Biegespannungen im Glas. Diese sind proportional zur gewählten Stichhöhe und zur gewählten Glasdicke. Eine Minimierung dieser Parameter ist anzustreben. Die Spannungen sind aber auch wesentlich abhängig von der Schubsteifigkeit der PVB-Folie zwischen den Gläsern. Ist die PVB-Folie starr, so ist die Biegespannung doppelt so groß wie bei weicher PVB-Folie, welche die widerstandslose Verschiebung der zwei Glasscheiben gegeneinander zulässt.

Es wurden Versuche durchgeführt, die das Verformungsvermögen und das Tragverhalten der PVB-Folie bei erhöhten Temperaturen sowie das Tragverhalten nach dem Erkalten untersuchen [Weischede, Fahlbusch; 2001]. Probestücke aus VSG mit einer 1,9 mm starken Zwischenschicht aus PVB-Folie der Firma HT-Troplast wurden bei verschiedenen hohen Temperaturen bis zu einem Schubwinkel von 1,71 in der Folie verformt und bei dieser Verformung bis zu 16 Stunden belassen. Es zeigte sich, dass bei 57°C die Schubspannung, nach Aufbringen der Verformung und einer Abklingphase von 5 Stunden, nur noch 0,0435 N/mm<sup>2</sup> beträgt. Daraus ergibt sich ein zu vernachlässigender Schubmodul von nur 0,018 N/mm<sup>2</sup>.

Für eine Temperatur von 60°C kann aus den Schubversuchsergebnissen ein Schubmodul von 0,005 N/mm<sup>2</sup> extrapoliert werden.

Die anschließenden Scherversuche an den bleibend verformten Versuchskörpern haben gezeigt, dass keine signifikanten Unterschiede des Tragverhaltens im Vergleich zu den unbehandelten Referenzprobekörpern bestehen.

Ad 2: Auch unter den später aufgebrachten äußeren Lasten auf das Glaselement ist das Verbundverhalten der PVB-Folie zu beachten. Zwar erzeugen die gleichmäßig verteilten Lasten überwiegend Druckkräfte im Glasbogen und damit keine Schubbeanspruchung. Momente infolge einer Abweichung von der Stützlinie erzeugen jedoch Schubbeanspruchungen, die von der Folie übertragen werden müssen.

Der Schubmodul der PVB-Folie wird in [Sobek, Kutterer, Messmer; 2000] bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer angegeben. Danach ergibt sich für eine angenommene Schneelastdauer von einem Monat und einer Temperatur von 10°C (was auf der sicheren Seite liegt) ein Schubmodul von 0,74 N/mm<sup>2</sup>.

### **3 Herstellung des Bogenglases**

Abgeleitet aus den Erkenntnissen über das thermoplastische Verhalten der PVB-Folie wird folgende Herstellung des Bogenglases festgelegt.

- Die ebene VSG-Scheibe wird in einem beheizbaren Raum auf eine Unterkonstruktion gelegt. Die Unterkonstruktion bildet die zu erzielende Form des Bogenglases in der Umkehrung (d.h. nicht als Bogen- sondern als Hängeform) ab. Zwei Rundstähle inklusive der an beiden Seiten befestigten Glashalter lagern ebenfalls im Raum. Dadurch wird eine übereinstimmende Temperatur von Glas- und Stahlelementen gewährleistet. Die Raumtemperatur wird auf 60°C erhöht.
- Nach Erreichen von 60°C ist die Abnahme der Verbundwirkung in der Glasscheibe deutlich sichtbar. Die Scheiben haben sich unter Eigenlast fast bis zum vorgegebenen Stich durchgebogen.
- Die fehlende Restverformung und damit die Anpassung an die durch die Unterkonstruktion vorgegebene Form wird durch zusätzliche Auflast erzeugt.
- Die Geometrie der Glasscheiben entspricht damit der Form der Unterkonstruktion. Die Rundstähle werden montiert und der Zwischenraum zwischen den Glasstirnseiten und Glashaltern wird mit dem Füllmaterial Hilti-Hit HY50 verpresst.
- Das fertig gestellte Bogenglaselement wird auf Raumtemperatur abgekühlt. Im Anschluss kann es umgedreht werden und wirkt fortan als Bogen.



## 4 Vorgaben der Berechnung

### 4.1 Geometrie und Materialien

Im Vorgriff auf die Ergebnisse werden in Tabelle 1 die Materialien und die Geometrie von Bogengläsern der Glasstärke je 2 x 4 bis 2 x 12mm zusammengefasst.

Tabelle 1: Materialien und Geometrie von Bogengläsern

Bogen- glastyp	1 Glasscheibe VSG aus 2 mal ESG mit PVB-Folie				2 Zugstäbe Edelstahl 1.4301 X700	4 Glashalter Edelstahl 1.4301 X700	
	Stärke der ESG- Scheiben t [mm]	Stärke der PVB- Folie fo [mm]	max. Spann- weite l [mm]	max. Breite b = l/2 [mm]	Durchmesser d [mm]	Blech- dicke t <sub>bl</sub> [mm]	Blech- breite b <sub>bl</sub> [mm]
12/5200	12	2,28	5200	2600	14	16	100
10/4310	10	1,9	4310	2155	12	14	100
8/3500	8	1,52	3500	1750	10	12	90
6/2650	6	1,52	2650	1325	10	10	70
5/2200	5	1,14	2200	1100	8	8	60
4/1800	4	1,14	1800	900	8	6	60

Ausgehend von der Spannweite l der Bogenglaselemente wird die Standardbreite der Elemente zu  $b = l/2$  festgelegt. Bei dieser Breite werden zwei Rundstahlstäbe angeordnet. Für diese Anordnung werden die Glasscheiben, Rundstahlstäbe und Glashalter dieser Statik berechnet.

Abgeleitet aus der Spannweite l des Bogenglases ergibt sich der Stich f zu:

$$f = l/16$$

und die Länge der Glasscheibe  $l_b$  zu:

$$l_b = 1,01 \cdot l$$

Der Winkel  $\alpha$  zwischen Glasbogen und Zugstab beträgt am Glashalter:

$$\alpha = 11^\circ$$

Die genannten geometrischen Parameter sind in Bild 2 erläutert. Die konstruktive Ausbildung des Glashalters wird in Kapitel 5.5 erläutert. Das erforderliche Lagerspiel für alle Glastypen ist in Tabelle 9 (Kap 6) angegeben.

Wird die Breite der Bogenglaselemente reduziert, so kann auch die Tragfähigkeit der Rundstahlstäbe und der Glashalter proportional zur Reduktion der Elementbreite reduziert

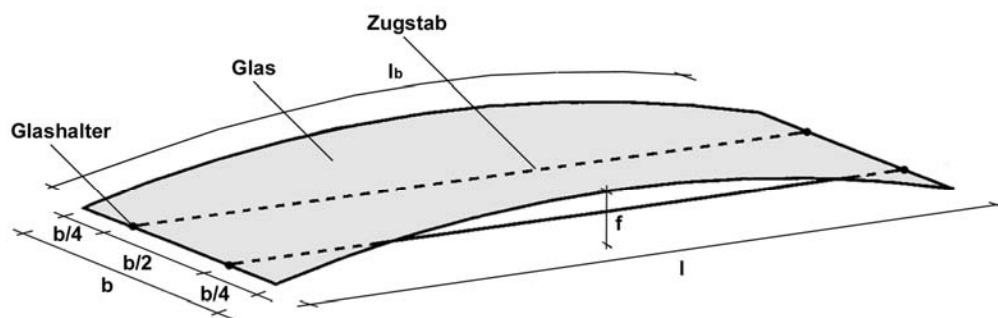


Bild 2: Abmessungen von Bogenglasscheiben

werden (Reduzierung der Rundstahlfläche, Reduzierung der Glashalterbreite). Es sind jedoch immer zwei Rundstahlstäbe notwendig.

Wird die Breite der Bogenglaselemente vergrößert, so muss die Anzahl der Rundstahlstäbe auf drei vergrößert werden. Die Summe der Tragfähigkeiten von Rundstahlstäben und Glashaltern muss proportional zur Vergrößerung der Elementbreite erhöht werden (d.h. Vergrößerung der Rundstahlfläche und Vergrößerung der Glashalterbreite).

Wie in Kapitel 2 gezeigt wurde, ist für die PVB-Folie aufgrund bisheriger Versuche ein Schubwinkel am Scheibenende von 1,27 möglich. Damit ergibt sich der maximal zulässige Scheibenversatz zu dem 1,27-fachen der PVB-Foliendicke.

## 4.2 Sicherheitskonzept, Sicherheitsbeiwerte und Materialkennwerte

Bogenglaselemente sind stabilitätsgefährdete Tragsysteme. Es ist der Nachweis der Tragsicherheit am verformten System erforderlich.

Zur Bemessung der Bogenglaselemente wird das Teilsicherheitskonzept nach [Shen, Wörner; 1998] und nicht das alte, globale Sicherheitskonzept der bislang verwendeten Regelungen zur Glasbemessung verwendet.

Als Teilsicherheitsbeiwerte auf der Beanspruchungsseite ergibt sich nach DIN 1055-100:

$$\gamma_F = 1,35 \text{ (Eigenlasten)}$$

$$\gamma_F = 1,50 \text{ (Schneelasten, Windlasten)}$$

Für die Widerstandsseite ergibt sich :

$$\gamma_M = 1,25$$

Der Flächeneinfluss beträgt bei ESG:

$$\eta_F = 1,00$$

Der Einfluss der Belastungsdauer beträgt bei ESG:

$$\eta_D = 0,85$$

Es ergeben sich folgende Bemessungswiderstandswerte des ESG:

$$\text{Spannung ESG: } \sigma_{R,d} = 120 \text{ N/mm}^2 \cdot \eta_F \cdot \eta_D / \gamma_M = 81,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Dehnsteifigkeit ESG: } E_{R,d} = 70.000 \text{ N/mm}^2 / \gamma_M = 56.000 \text{ N/mm}^2$$

Für die PVB-Folie ermittelt sich nach Kapitel 2 der Schubmodul bei Temperaturen unter 10°C (Lastfall Schnee).

$$\text{Schubmodul PVB: } G_{R,d} = 0,74 \text{ N/mm}^2 / \gamma_M = 0,59 \text{ N/mm}^2$$

Beim Vorspannen der Scheiben ergibt sich der Schubmodul der Folie bei 60°C nach Kapitel 2 zu:

$$\text{Schubmodul PVB: } G_{R,d} = 0,005 \text{ N/mm}^2$$

Dieser Wert wird bei der Berechnung als charakteristischer Wert eingesetzt.

Bei den Versuchen zum Folienverhalten wurden PVB-Folien der Firma HT-Troplast eingesetzt. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird die Verwendung von PVB-Folien dieser Firma empfohlen.

Als Material für die Zugstäbe und Glashalter wird Edelstahl 1.4302 X700 gewählt. Die charakteristische Zugspannung beträgt:

$$f_{y,k} = 36 \text{ kN/cm}^2$$

Unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M = 1,1$  ergibt sich der Bemessungswert des Widerstandes zu:

$$f_{y,d} = 32,7 \text{ kN/cm}^2$$

### 4.3 Toleranzen

Die Dickentoleranzen von VSG-Scheiben sind nach DIN EN 572 Teil 2, 4 und 5 geregelt. Für Scheiben bis zu einer Dicke von 6mm sind Abweichungen von  $\pm 0,2 \text{ mm}$  und bis zu einer Dicke von 12 mm sind Abweichungen von  $\pm 0,3 \text{ mm}$  erlaubt.

Aus wirtschaftlichen Gründen sind die Glashersteller bemüht an der unteren Toleranzgrenze zu produzieren, ohne diese jedoch zu unterschreiten.

Grundsätzlich sind Maßtoleranzen in der Sicherheit auf der Widerstandsseite enthalten. Da in diesem Falle jedoch die Dicke der Glasscheibe von besonderer Wichtigkeit für die Steifigkeit und somit für die Stabilität des Bogens ist, wird hier von einer Unterschreitung der Nennscheibendicke um 0,1mm ausgegangen.

#### 4.4 Vorspannung durch Krümmung der Scheiben

Nach der Herstellung des Bogenglases ist die Momentenbeanspruchung aus der Vorspannung im Bogenscheitel maximal und klingt zu den Enden der Glasscheibe hin vollständig ab. Die sich ergebende Bogengeometrie kann sehr gut durch die Sinusfunktion zwischen 0 und  $\pi$  angenähert werden.

Für das Ausweichen in der Bogenebene wird in Anlehnung an DIN 18800 T.2 eine geometrische Ersatzimperfektion nach Tabelle 23 Zeile 2 angesetzt. Der Glasbogen wird als Vollquerschnitt angesetzt (Knickspannungslinie c). Es ergibt sich bezogen auf die Bogenspannweite die Ersatzimperfektion

$$w_0 = l/400$$

nach Bild 3. Diese Imperfektion wird sowohl für die halbseitige Schneelast als auch für die volle Schneelast maßgebend.

#### 4.5 Äußere Beanspruchungen

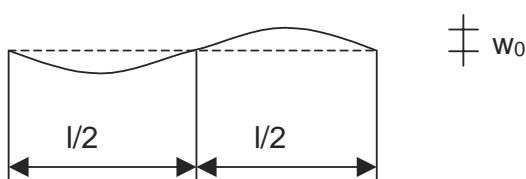


Bild 3: Ersatzimperfektion für das Ausweichen in Bogenebene, Tabelle 23, DIN 18800 Teil II

Das Eigengewicht des Glases wird mit  $g = 25\text{kN/m}^3$  angesetzt.

Die Regelschneelast der Schneelastzone II bei einer Geländehöhe von 600 mNN,  $s = 1,15$   $\text{kN/m}^2$  wird angesetzt.

Für die Windbeanspruchung wird eine maximale Höhe von 8 m über Gelände angesetzt. Es ergibt sich ein Staudruck von  $q = 0,5 \text{ kN/m}^2$ . Unter der Annahme, dass ein freistehendes Dach seitlich versperrt ist, berechnen sich die Druckbeiwerte oben und unten zu  $c_{po} = 0,6$  und  $c_{pu} = 0,8$ . Die Windlast beträgt damit  $w = 0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,4 = 0,7 \text{ kN/m}^2$

#### 4.6 Beanspruchung aus der Resttragfähigkeit

Sowohl für die Loggia in Wasseraltingen als auch für den zentralen Omnibushof in Heidenheim wurden Resttragfähigkeitsversuche durchgeführt [Bucak, Schuler; 2002], [Bucak, Koch; 2003]. Die Lagerung der Bogengläser entsprach der späteren Einbausituation vor Ort.

In allen Fällen kam es erst nach Zerstörung der zweiten Glastafel zum Gesamtversagen des Bogens.

Die kleinteilig zerbrochenen ESG-Glasscheiben legten sich auf den Zugstäben ab (Bild 4).

Ein Einreißen der Folie in den Randbereichen oder am Glashalter wurde nicht festgestellt. Die geforderte Resttragfähigkeitsdauer von 48 h wurde eingehalten.



Bild 4: Resttragfähigkeitsversuch

Die Beanspruchung der Zugstäbe wurde gemessen. Sie war in keinem Falle maßgebend. Die Beanspruchung der Unterkonstruktion ergibt sich aus dem Durchhang der Zugstäbe nach dem Versagen des Glasbogens und einem dynamischen Faktor. Der dynamische Faktor wird anhand der Versuchsergebnisse ermittelt.

### 5 Vorgehen bei der Berechnung am Beispiel der Bogenglasscheibe mit 2 x 12mm Stärke

Anhand der Glasscheibe mit einer Scheibendicke von 2 x 12 mm und einer Bogenspannweite von 5,20 m wird im Folgenden beispielhaft der Berechnungsweg beschrieben.

Die Berechnung mittels des dreidimensionalen finite Elemente Programms der Firma Sofistik [Sofistik; 2000] erfolgt unter Berücksichtigung des Gleichgewichts am verformten System.

Die Berechnung des Glasbogens wird sowohl mit der Bemessungssteifigkeit als auch mit charakteristischer Steifigkeit des Glases durchgeführt. Die entsprechenden Berechnungen wurden „Bogen 1216“ (Bemessungssteifigkeit) und „Bogen 1216 E“ (charakteristische Steifigkeit) benannt.

Die Berechnung mit der Bemessungssteifigkeit ergibt infolge des Verformungslastfalles „Vorspannen“ zwar geringere Spannungen im Glas, jedoch auch eine niedrigere Knicklast als Folge der geringeren Steifigkeit.

Die Berechnung mit charakteristischer Steifigkeit ergibt infolge des Verformungslastfalles „Vorspannen“ höheren Spannungen im Glas aber auch eine höhere Knicklast.

Im Nachhinein muss dann bewertet werden, welche Berechnung maßgebend ist, und ob die Grenze der Tragfähigkeit des Systems durch Überschreiten der Grenzspannung oder durch Erreichen der Knicklast gegeben ist.

Für die Bögen mit geringeren Glasdicken wird nur noch die maßgebende Berechnung durchgeführt.

## 5.1 Materialeigenschaften, FE-Modell, und Auflagerbedingungen

In Tabelle 2 sind die gewählten Materialeigenschaften zusammengefasst.

Tabelle 2: Materialeigenschaften

Rechenmodell	Material	Steifigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]
Bogen 1216	Glas	E = 56.000	25,0
	PVB-Folie, kalt	G = 0,590	12,0
	PVB-Folie, warm	G = 0,005	12,0
	Edelstahl	E = 170.000	78,5
Bogen 1216 E	Glas	E = 70.000	25,0
	PVB-Folie, kalt	G = 0,590	12,0
	PVB-Folie, warm	G = 0,005	12,0
	Edelstahl	E = 170.000	78,5

Die Glasscheibe wird mit finiten Elementen (ebene Quad- Elemente) abgebildet, deren Dicke 11,9 mm beträgt. Die Elemente haben Membran und Plattentragwirkung. Die 5,25 m lange und 2,60 m breite Glasscheibe wird in Längsrichtung in 22 und in Querrichtung in 8 Elemente geteilt. Die einzelne Elementgröße ist folglich 0,24 m auf 0,32 m.

Die Knoten der Elemente sitzen bei der oberen Glasscheibe an deren Unterkante und an der unteren Glasscheibe an der Oberkante.

Während des Aufbringens der Krümmung in der Klimakammer bei 60°C wird die Folie im Scheibenzwischenraum durch Federn abgebildet. Senkrecht zur Scheibenebene ist diese Feder steif. Parallel zur Scheibenebene wird der Schubmodul der PVB-Folie mit der Federsteifigkeit  $k_1$

$$k_1 = \frac{H}{u} = \frac{G \cdot A}{h} = 170 \text{ N/mm}$$

H= Horizontalkraft

u= Verschiebung

h= Foliendicke

abgebildet (Bild 5). Dabei ist  $G$  der Schubmodul der PVB-Folie bei 60°Celsius,  $A$  die Einflussfläche der einzelnen finiten Elemente und  $h$  der Abstand der Gläser. Am Scheibenrand ist die Einflussfläche halb so groß.

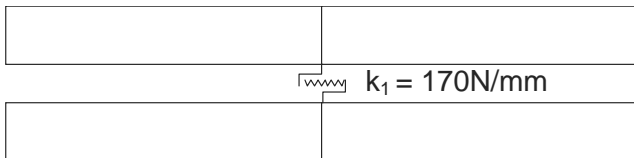


Bild 5: Abbildung der schubweichen PVB-Folie beim Krümmen des Bogenglases

Im kalten Zustand wird die Folie durch ein Fachwerkmodell abgebildet (Bild 6).

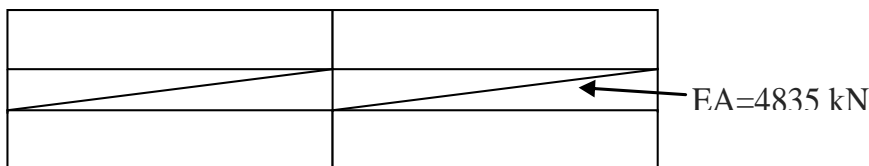


Bild 6: Abbildung der schubsteifen PVB-Folie beim Lastfall Schnee

Der Stab senkrecht zur Scheibenebene wird dehnstarr angenommen. Der diagonale Fachwerkstab bildet die Schubsteifigkeit der PVB-Folie im Lastfall Schnee ab. Er verläuft diagonal in Bogenrichtung zum nächsten, versetzt liegenden Knoten. Durch den geringen Abstand der Scheiben ist die Stablänge nahezu identisch mit der Länge eines Glaselementes. Der Winkel der Diagonalen ist zu vernachlässigen.

Die Dehnsteifigkeit der Diagonalen berechnet sich wie folgt:

$$EA = G \cdot A_0 \cdot \frac{l_b}{i_x} \cdot \frac{1}{f_0} = 4835 \text{ kN}$$

- mit:
- $E$  = E-Modul des Fachwerkstabes (12088 N/mm<sup>2</sup>)
  - $A$  = Fläche des Fachwerkstabes (Mitte 2cm · 2cm, Rand 1cm · 2cm)
  - $G$  = Schubmodul der Folie im kalten Zustand (0,59 N/mm<sup>2</sup>)
  - $A_0$  = Schubfläche der Folie zwischen den Glaselementen ( $l_b/i_x \cdot B/i_y$ )
  - $l_b/i_x$  = Elementlänge (5250mm/22)
  - $f_0$  = Foliendicke (2,28mm)



Parallel zu den Auflagern verlaufen, von diesen ausgehend, diagonale Fachwerkstäbe, die die obere Glasscheibe auf der Unteren in Horizontalrichtung stabilisieren.

Bild 7 zeigt die ebene Glasscheibe vor Aufbringen der Scheibenkrümmung. Bild 8 zeigt das Bogenglas nach dem Krümmen der Scheiben.

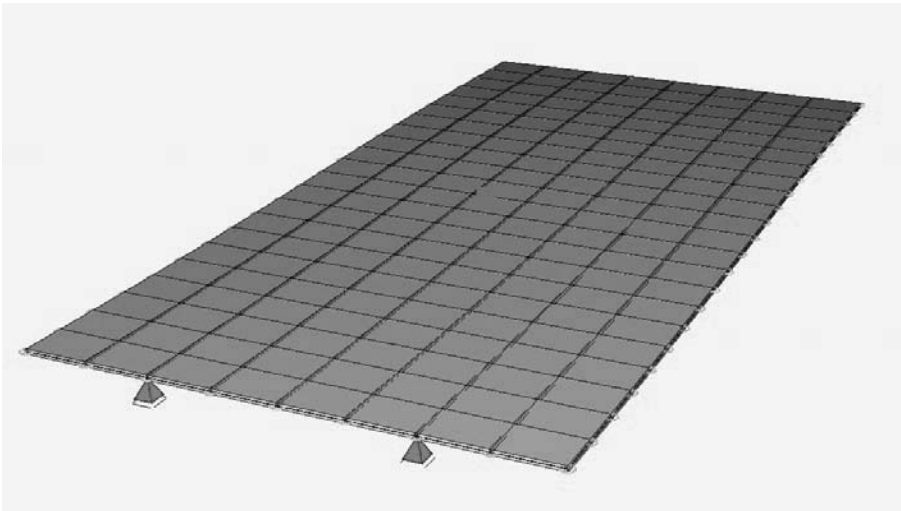


Bild 7: Struktur der ebenen Glasscheibe vor Aufbringen der Scheibenkrümmung

Der Glasbogen wird durch die Zugstäbe aus Edelstahl mit einem Durchmesser von 14mm in den Viertelpunkten der Scheibenbreite in seiner Form fixiert.

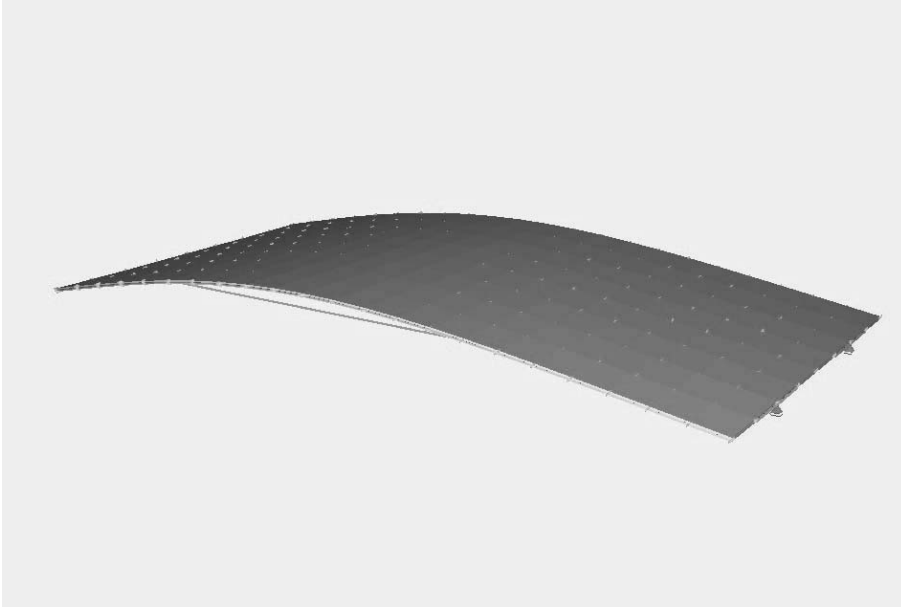


Bild 8: Struktur des Bogens nach dem Krümmen der Scheiben

Zu Vermeidung von Exzentrizitäten in den Anschlüssen wird der Zugstab so geteilt, dass die übereinander liegenden Knoten jeweils einen Zugstab mit der halben Querschnittsfläche erhalten.

Die Glasscheibe ist an den Knotenpunkten, an denen die unteren Zugstäbe angreifen, so gelagert, dass keine horizontale Verschieblichkeit möglich ist, aber auch kein Zwang entsteht (Bild 9). Die Lagerung ist gelenkig.

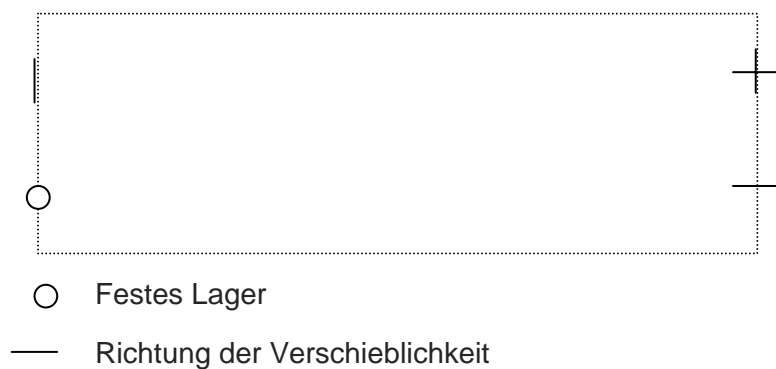


Bild 9: Lagerbedingungen

## 5.2 Berechnung des Herstellungsprozesses

In einem ersten Lastfall für die ebene Glasscheibe wird die Vorkrümmung in der Klimakammer bei 60°C simuliert. Die Glasscheiben werden mit dem Eigengewicht und einer Gleichflächenlast in negativer Z-Richtung schrittweise so belastet, dass die gewünschte

Durchbiegung nach oben entsteht. Die PVB-Folie wird dabei, wie in Bild 5 gezeigt, schubweich abgebildet.

Im Anschluss werden in einem weiteren Lastfall die Zugstäbe angeschlossen. In der Berechnung werden die Eigenspannungen und Verformungen aus dem vorigen Lastfall übernommen. Die Belastung in negativer Z-Richtung entfällt. Das Eigengewicht in positiver Z-Richtung bleibt. Der Bogen stellt nun, geprägt durch die Zugstabkräfte und das Eigengewicht seine Form ein.

Zum Abschluss der Simulation des Herstellungsprozesses wird die Schubsteifigkeit der PVB-Folie entsprechend Bild 6 geändert. Der Bogenstich von  $l/16$  wird überprüft.

Bild 10 zeigt die Vergleichsspannungen nach dem Vorspannen des Bogenglasses unter charakteristischem Eigengewicht. In Tabelle 3 sind die maximalen Vergleichsspannungen die Auflager- und die Zugstabkräfte dokumentiert.

Sowohl im Glasbogen als auch in den Zugstäben bewirkt die höhere Steifigkeit des Glases im Modell „Bogen 1216 E“ eine höhere Beanspruchung.

Tabelle 3: maximale Spannungen und Kräfte im Lastfall Eigengewicht

Rechenmodell	maximale Vergleichs- spannung $\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	charakteristische vertikale Lagerkraft je Lager $A_v$ [kN]	charakteristische Normalkraft je Zugstab N [kN]
Bogen 1216	46,3	2,2	16,9
Bogen 1216 E	57,0	2,2	18,6

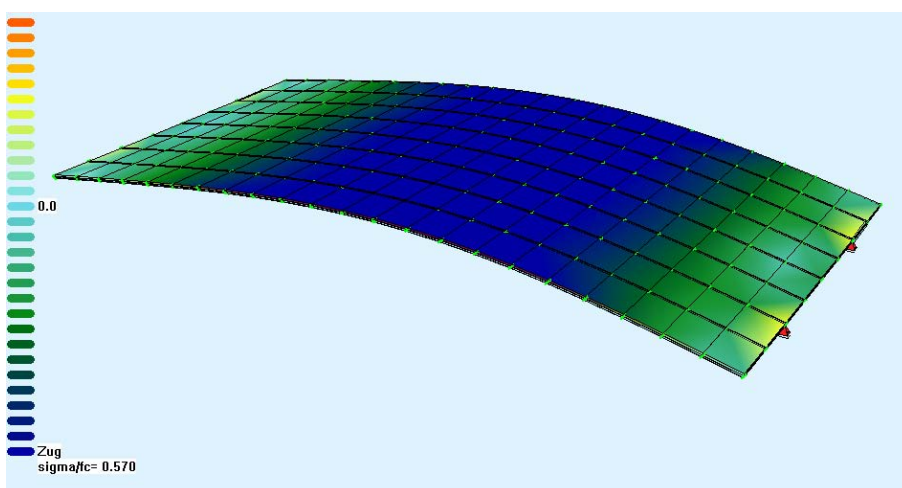


Bild 10: Vergleichsspannungen nach dem Vorspannen unter charakteristischer Eigenlast im Rechenmodell „Bogen 1216“

## 5.3 Berechnung der maßgebenden Lastfälle und Nachweise der Glasscheibe

### 5.3.1 Ermittlung der Knicklast

Für die Ermittlung der Knicklast als Flächenlast wird die Gleichflächenlast auf dem Glasbogen solange gesteigert, bis das System instabil wird. Die Beanspruchungen aus der Herstellung des Bogenglases werden dabei berücksichtigt.

Bild 11 zeigt die Vergleichsspannungen von „Bogen 1216“ bei der Knicklast.

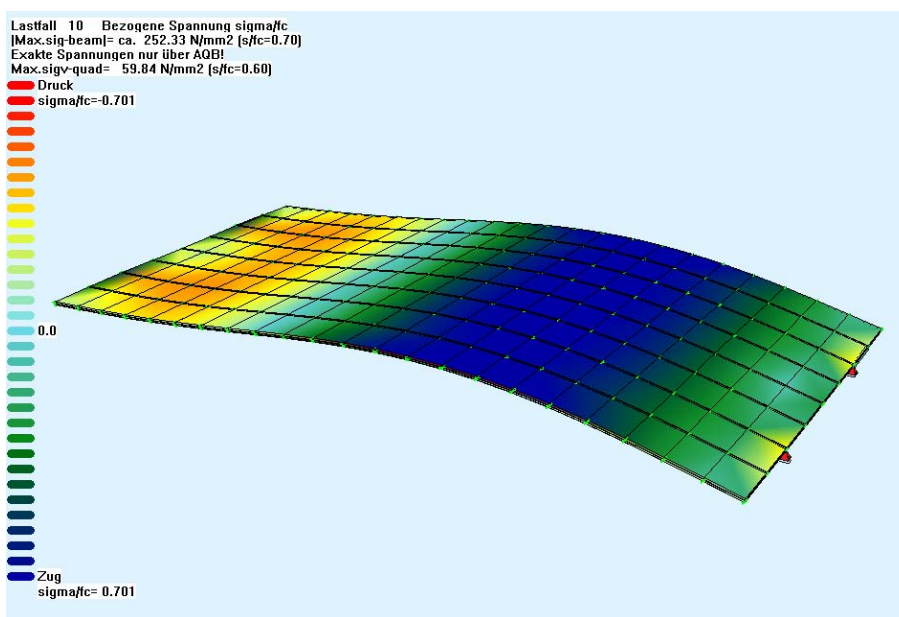


Bild 11: Vergleichsspannungen bei der Knicklast im Rechenmodell „Bogen 1216“

In Tabelle 4 wird die Knicklast  $q_{ki}$  und die dazugehörige maximale Vergleichsspannung  $\sigma_{v,q,ki}$  der zwei Rechenmodelle angegeben. Das Verhältnis der Bemessungslast  $q_d$  zur Knicklast  $q_{ki}$  gibt die Ausnutzung der Stabilität wieder und ist ebenfalls in Tabelle 4 angegeben. Die Bemessungslast ergibt sich aus der Addition von Bemessungseigenlast und Bemessungsschneelast ( $q_d = 2,54 \text{ kN/m}^2$ ).

Tabelle 4: Knicklast und Ausnutzung der Rechenmodelle

Rechenmodell	Knick- flächenlast $q_{ki}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Maximale Vergleichsspannung $\sigma_{v,q,ki}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q_d / q_{ki}$	$\sigma_{v,q,ki} / \sigma_{R,d}$
Bogen 1216	2,68	59,8	0,94	0,73
Bogen 1216 E	3,04	68,9	0,83	0,84

Das Verhältnis der maximalen Vergleichsspannung  $\sigma_{v,q,ki}$  zum Bemessungswert der Spannungen  $\sigma_{R,d}$  gibt die Ausnutzung der Spannungen wieder und ist ebenfalls in Tabelle 4 angegeben. Der Bemessungswert der Spannungen  $\sigma_{R,d}$  beträgt 81,6N/mm<sup>2</sup>.

Es zeigt sich, dass in Bezug auf die Stabilität das Rechenmodell „Bogen 1216“ mit den Bemessungswerten der Steifigkeiten maßgebend wird ( $q_d / q_{ki} = 0,94$ ). In Bezug auf die Spannungen wird das Rechenmodell „Bogen 1216 E“ mit den charakteristischen Steifigkeiten maßgebend ( $\sigma_{v,q,ki} / \sigma_{R,d} = 0,84$ ). Insgesamt ist jedoch das Rechenmodell „Bogen 1216“ maßgebend, da hier die Ausnutzung mit 0,94 am höchsten ist.

Somit ist auch für die Berechnung von Bögen mit kleineren Glasdicken die Berechnung mit abgemindertem E-Modul maßgebend.

### 5.3.2 Nachweis der Volllast

Die maßgebende Belastung für Volllast ist Eigengewichtslast und Schneelast unter Berücksichtigung des jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerts. Der Bemessungswert der Volllast beträgt  $q_d = 2,54$  kN/m<sup>2</sup> (vgl. Kapitel 4.4,  $g_d = 0,81$  kN/m<sup>2</sup>,  $s_d = 1,73$  kN/m<sup>2</sup>). Die Beanspruchung aus dem Herstellungsprozess wird ebenfalls berücksichtigt.

Bild 12 zeigt den zu diesem Lastfall gehörigen Spannungszustand.

Der Nachweis der Stabilität unter Volllast wurde bereits in Kapitel 5.3.1 erbracht.

In Tabelle 5 sind die maximalen Vergleichsspannungen die Auflager- und die Zugstabkräfte dokumentiert.

Tabelle 5: maximale Spannungen und Kräfte unter Bemessungsvolllast

Rechenmodell	maximale Vergleichs- spannung $\sigma_{v,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	vertikale Bemessungslagerkraft je Lager $A_{d,v}$ [kN]	Bemessungs- normalkraft je Zugstab $N_d$ [kN]
Bogen 1216	57,6	8,8	46,9
Bogen 1216 E	64,0	8,8	47,4

Bei beiden Berechnungen wird der Bemessungswert der Spannungen  $\sigma_{R,d}$  eingehalten.

Sowohl im Glasbogen als auch in den Zugstäben bewirkt die höhere Steifigkeit des Glases

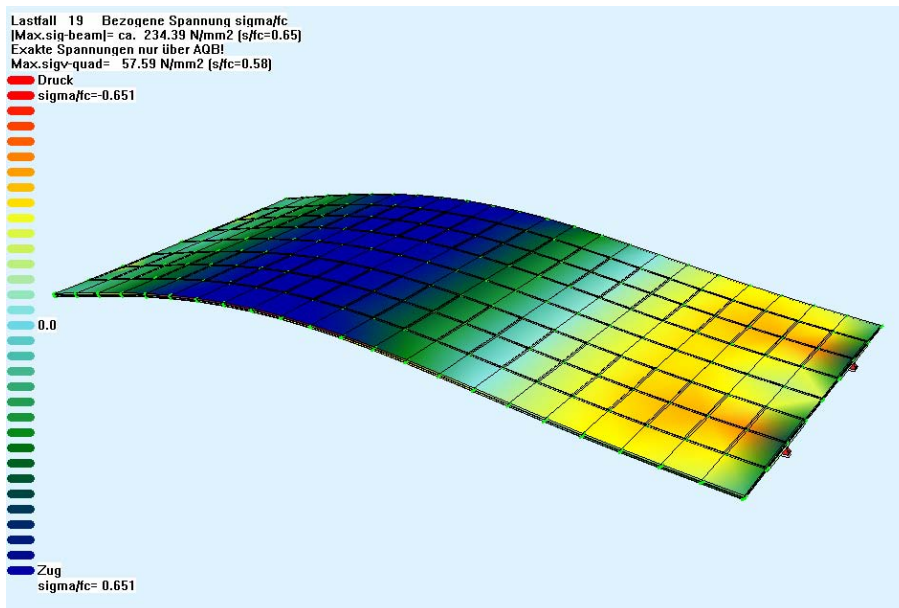


Bild 12: Vergleichsspannungen unter Bemessungsvolllast im Rechenmodell „Bogen 1216“

von „Bogen 1216 E“ eine höhere Beanspruchung. Diese Erhöhung fällt gegenüber der in Tabelle 2 ermittelten Erhöhung (Lastfall Vorspannen und Eigengewicht) schon deutlich geringer aus. Die Spannungen sind im Modell „Bogen 1216 E“ um 12% gegenüber „Bogen 1216“ erhöht. Die Erhöhung der Zugstabkraft geht gegen null.

### 5.3.3 Nachweis der halbseitigen Last

Die maßgebende Belastung für halbseitige Last ist die Eigengewichtslast und die halbe Schneelast auf einer Bogenhälfte unter Berücksichtigung des jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerts. Wie zuvor wird die Beanspruchung aus dem Herstellungsprozess berücksichtigt.

Bild 13 zeigt den Spannungszustand, Tabelle 6 benennt die maximalen Vergleichsspannungen unter halbseitiger Bemessungslast.

Bei beiden Rechenmodellen wird der Bemessungswert der Spannungen  $\sigma_{R,d}$  eingehalten.

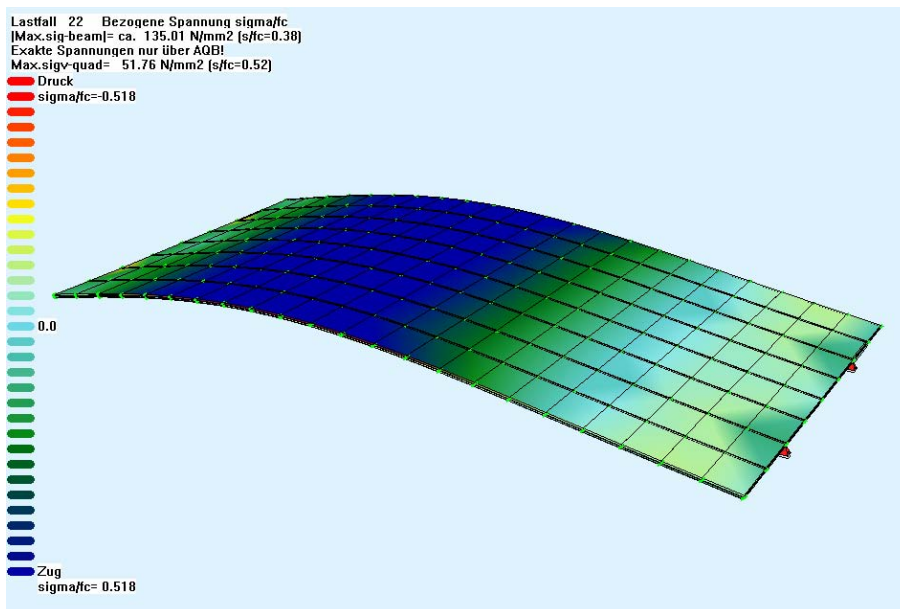


Bild 13: Vergleichsspannungen bei halbseitiger Bemessungslast im Rechenmodell „Bogen 1216“

Tabelle 6: Maximale Spannungen bei halbseitiger Bemessungslast

Rechenmodell	Maximale Vergleichsspannung $\sigma_{v,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Bogen 1216	51,8
Bogen 1216 E	56,1

### 5.3.4 Nachweis der abhebenden Last

Für abhebende Lasten wird Windsog am Dach unter der Annahme einer Verstellung hinter dem Dach maßgebend. Nach Kapitel 4.4 ergibt sich der Bemessungswert der Windsoglast zu  $w_d = 1,05 \text{ kN/m}^2$ .

Das Eigengewicht wird mit einem Teilsicherheitsfaktor 1,0 berücksichtigt.

Die Schubsteifigkeit wird im Lastfall Wind wieder wie bei der Vorbelastung in der Klimakammer bei  $60^\circ\text{C}$  angenommen und damit praktisch vernachlässigt. Die Beanspruchung aus dem Herstellungsprozess wird ebenfalls berücksichtigt.

Die Windsoglast ist geringer als die Last aus Eigengewicht und die Last, welche man zum Vorkrümmen der 5,25 m langen Scheiben benötigt. Der Windsog bringt damit bei den Scheiben dieser Größe keine zusätzliche Spannungen oder Lasten.

Bild 14 zeigt den Spannungszustand, Tabelle 7 benennt die maximalen Vergleichsspannungen bei abhebender Bemessungslast.

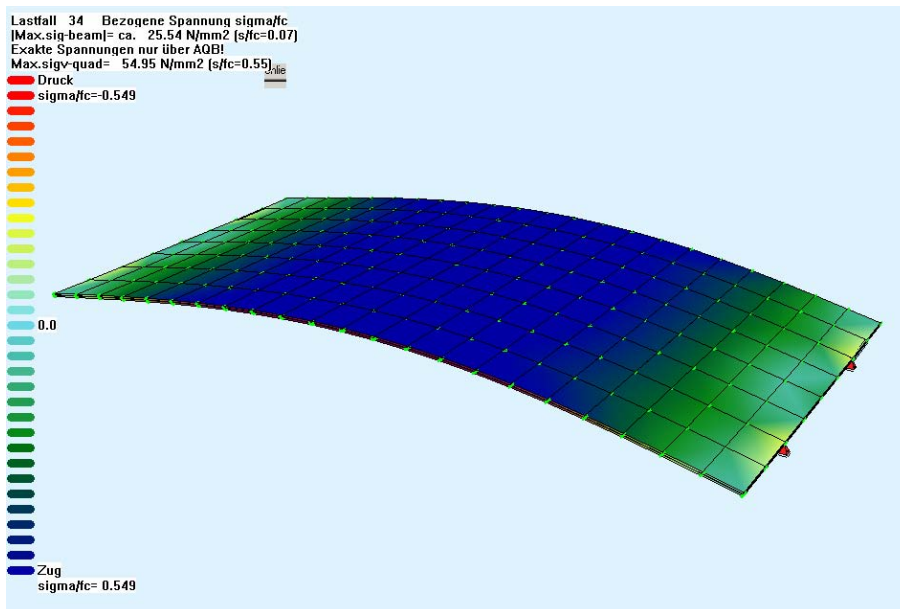


Bild 14: Vergleichsspannungen bei abhebender Bemessungslast im Rechenmodell „Bogen 1216“



Tabelle 7: Spannungen im Lastfall Windsog

Lastfall		Bogen1216	Bogen1216 E
LF Windsog	Max. Hauptzugspannung	43,4 [N/mm <sup>2</sup> ]	55 [N/mm <sup>2</sup> ]

### 5.3.5 Nachweis des Schubwinkels am Glasrand

Der Schubwinkel lässt sich aus der Verschiebung der Knoten am Auflager berechnen (siehe Bild 15).

Der Knoten 47 der unteren Glasscheibe ist unverschieblich, der darüber liegende Knoten 1047 der oberen Glasscheibe ist verschieblich gelagert.

Da die Knoten an den Scheibenrändern liegen, kann aus den Verschiebungen in x und y Richtung die Gesamtverschiebung ermittelt werden.

Knoten 1047:  $u_x = 2,671 \text{ mm}$ ;  $u_z = 0,734 \text{ mm}$ , damit:  $u = 2,77 \text{ mm}$

Foliendicke

$f_o = 2,28 \text{ mm}$

Schubwinkel

$\gamma = u / f_o = 1,21$

Der Schubwinkel ist somit kleiner als der Grenzwert von 1,27 (Kapitel 2).

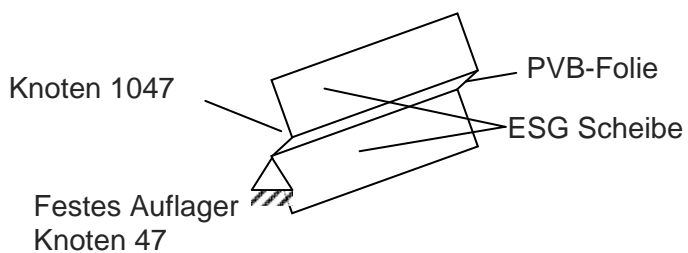


Bild 15: Darstellung des Schubwinkels am Bogenrand

## 5.4 Zugstäbe

Wie in Tabelle 2 (Lastfall Vorkrümmung und Eigengewicht) gezeigt wurde, ist die Zugkraft des Rechenmodells mit größerer Glassteifigkeit größer als jene im Rechenmodell mit kleinerer Glassteifigkeit. Die Differenz beträgt 1,7kN. Bei Volllast (Tabelle 4) wird diese Differenz zumindest bei der hier betrachteten Bogenglasberechnung deutlich kleiner und somit vernachlässigbar.

Diese Differenz rührt in erster Linie aus dem unterschiedlichen Widerstand der Berechnungs-Glasscheiben beim Vorspannen her. Die Zugkraft, die in den Zugstäben zum Vorspannen aufgebracht werden muss, entspricht der Knicklast der Glasscheibe. Die Differenz der Zugstablast kann daher auch direkt als Differenz der Knicklast der unterschiedlich steifen Scheiben direkt berechnet werden:

$$\Delta N_{ki} = \left[ \frac{\pi}{l_b} \right]^2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{\gamma} \right) \cdot E \cdot I \cdot 2 = 1,83 \text{ kN}$$

$l_b$  = Scheibenlänge (5,25 m)

$\gamma$  = Teilsicherheitsfaktor für den E-Modul (1,25)

$E$  = E-Modul (70.000 N/mm<sup>2</sup>)

$I = b \cdot h^3 / 12$  = Biegesteifigkeit einer Einzelscheibe (18,25 cm<sup>4</sup>)

$b$  = Einflussbreite des Zugstabes (1,3 m)

$h$  = Dicke einer ESG-Scheibe (11,9 mm)

$\Delta N_{ki}$  gibt damit sowohl für den Lastfall Vorkrümmung und Eigengewicht als auch für den bezüglich der Zugstabbemessung maßgebenden Lastfall Volllast eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung der Differenzlast, um welche die Zugstabkraft der Berechnung „Bogen 1216“ erhöht werden muss. Die erhöhte Zugstablast kann dann der Stabbemessung zugrunde gelegt werden.

Im Fall der hier vorliegenden Bogenglasscheibe mit 5,20 m Spannweite ergibt sich die Bemessungslast also zu:

$$N_d' = N_d + \Delta N_{ki} = 46,9 \text{ kN} + 1,8 \text{ kN} = 48,7 \text{ kN}$$

Die Querschnittsfläche des Zugstabes ( $d = 1,4 \text{ cm}$ ) ergibt sich zu:

$$A = d^2 \cdot \pi / 4 = 1,54 \text{ cm}^2$$

Die Bemessungsspannung beträgt also:

$$\sigma_d = N_d' / A = 48,7 \text{ kN} / 1,54 \text{ cm}^2 = 31,6 \text{ kN/cm}^2$$

Die Zugstäbe sind aus Edelstahl (1.4301 X700) zu fertigen. Der Bemessungswert des Widerstandes beträgt:

$$\sigma_{Rd} = 36 \text{ kN/cm}^2 / 1,1 = 32,7 \text{ kN/cm}^2$$

Die Ausnutzung des Zugstabs beträgt also 97 %.

## 5.5 Glashalter

Die Glashalterkonstruktion umfasst die Glasscheibe an ihren Enden. Sie muss die Bogendruckkräfte der Scheibe aufnehmen und an den Zugstab weiterleiten. Gleichzeitig dient der Glashalter auch als Auflager des Bogenglases auf der Unterkonstruktion.

Die vertikale Achslinie des Auflagers muss senkrecht unter dem Schnittpunkt der Achslinien von Zugstab und Bogen liegen. Bild 16 gibt das Prinzip der Konstruktion mit der Angabe der geometrischen Parameter wieder.

Die Beanspruchung des Glashalters ergibt sich aus der Zugstabkraft  $N_d'$  (Kapitel 5.4) und der Auflagerkraft unter Vollast  $A_d$  (Kapitel 5.3.2). Die Bogendruckkraft  $B_d$  wird durch vektorielle Addition dieser zwei Kraftkomponenten ermittelt:

$$N_d' = 48,7 \text{ kN}$$

$$A_d = 8,8 \text{ kN}$$

$$B_d = 49,5 \text{ kN}$$

Ausgehend von einer

Glasstärke  $t =$  2 x 12 mm, einer

PVB-Folienstärke  $f_o =$  2,3 mm und bei allen Bogenglastypen gewählt

Dicke der Elastomerpolster  $g_u =$  3 mm

werden folgende Glashalterdimensionen gewählt:

$$\text{Blechdicke} \quad t_{bl} = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Blecbreite} \quad b_{bl} = 100 \text{ mm}$$

Die Anfangssteigung des Glasbogens am Auflager beträgt 11°.

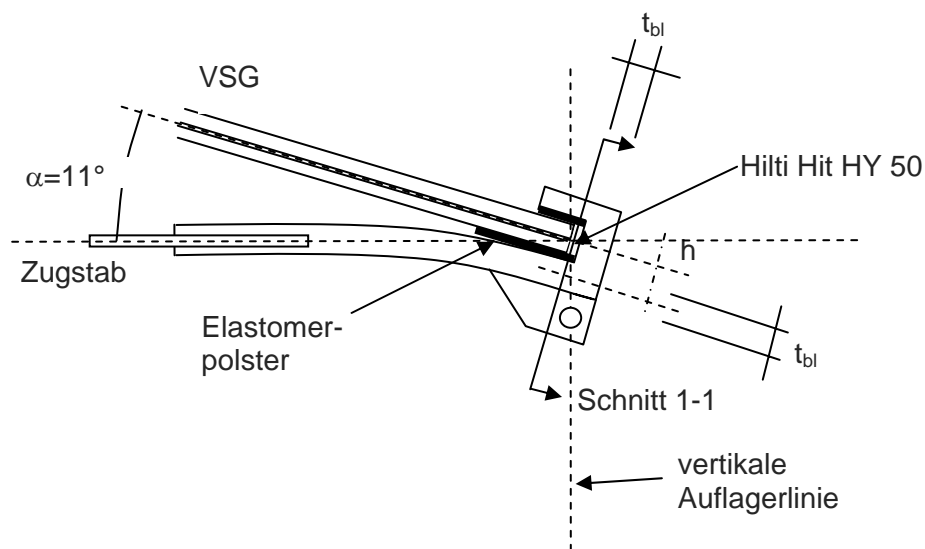


Bild 16: Glashalter

Beanspruchung des Glashalters im Schnitt 1-1:

Hebelarm $h =$	$t + f_o / 2 + g_u + t_{bl} / 2 = 24,1 \text{ mm}$
Moment $M =$	$B_d \cdot h = 1,2 \text{ kNm}$
Fläche $A =$	$t_{bl} \cdot b_{bl} = 16 \text{ cm}^2$
Widerstandsmoment $W =$	$t_{bl}^2 \cdot b_{bl} / 6 = 4,27 \text{ cm}^3$
	$= 31,3 \text{ kN/cm}^2$

Der Glashalter ist aus Edelstahl (1.4301 X700) zu fertigen. Der Bemessungswert des Widerstandes beträgt:

$$\sigma_{Rd} = 36 \text{ kN/cm}^2 / 1,1 = 32,7 \text{ kN/cm}^2$$

Die Ausnutzung des Glashalters beträgt also 96 %.

Pressung des Kontaktmaterials

Als Kontaktmaterial zwischen Stahl und Glas wird die Fugenmasse Hilti Hit HY 50 eingesetzt. Die Stärke des Materials muss bei allen Bogenglastypen mind.

5mm betragen.

Als Kontaktfläche steht die Blechbreite  $b_{bl}$  von 100 mm und die Glasstärke  $t$  von 2 x 12 mm zur Verfügung. Um eventuelle lokale Spannungsspitzen auszugleichen, werden nur 80% der Breite und Höhe der Kontaktfläche als rechnerische Kontaktfläche  $A_K$  angesetzt:

$$A_K = b_{bl} \cdot t \cdot 2 \cdot 0,8^2 = 15,4 \text{ cm}^2$$

In der Kontaktfläche ergibt sich eine Pressung von:

$$\sigma = \frac{B_d}{A_K} = 3,25 \text{ kN/cm}^2$$

Diese Spannung ist geringer als die nach Zulassung zulässige Spannung für Hilti Hit HY 50 von 4,00 kN/cm<sup>2</sup>.

Um einen Kontakt von Glas und Stahl an der Ober- und Unterseite der Glasscheibe zu vermeiden, werden als Zwischenlage Elastomerplatten mit der Shorehärte von ~ 80° eingelegt.

## 5.6 Unterkonstruktion

### 5.6.1 Erforderliches Lagerspiel aus den Regellastfällen

Unter den Belastungen aus Schnee- und Windlasten soll das System Glasbogen mit Zugband keine horizontalen Lasten an die Unterkonstruktion abgeben. Um dies zu gewährleisten, muss sich eine Auflagerseite nach dem Aufbau des Glasbogens horizontal verschieben lassen. Aus der Eigengewichtslage muss sich der Auflagerpunkt unter Windsog nach innen und unter Schneelast nach außen verschieben können. Die Verschieblichkeit wird durch ein Langloch in der Unterkonstruktion gewährleistet.

In Tabelle 8 werden die Verschiebungen des Auflagerpunktes  $u_x$  unter Eigenlast (charakteristisch) und unter der Volllast (Eigenlast und Schneelast je  $\gamma$ -fach) angegeben. Die Differenz beider Lastfälle  $\Delta u_{xa}$  wird berechnet und gibt das erforderliche Lagerspiel nach außen an. Maßgebend ist die Berechnung „Bogen 1216“ mit der reduzierten Steifigkeit der Glasscheiben.

Tabelle 8: Horizontale Lagerverschiebungen

Rechenmodell	$u_x$ Eigengewicht (char.) [mm]	$u_x$ Vollast ( $\gamma$ -fach) [mm]	$\Delta u_{xa}$ [mm]
Bogen 1216	48,5	44,1	4,4
Bogen 1216 E	48,8	44,6	4,2

Wie in Kapitel 5.3.4 gezeigt ist, werden die aus dem Herstellungsprozess und dem Eigengewicht vorgespannten Zugstäbe im Lastfall Windsog nicht vollständig entlastet.

Auf der sicheren Seite wird das erforderliche Lagerspiel nach innen dem Dehnweg des Zugstabes im Lastfall Eigengewicht (Kapitel 5.2) gleichgesetzt.

Mit der Normalkraft von 16,9 kN im Zugstab und der Querschnittsfläche von 1,54 cm<sup>2</sup> ergibt sich die Spannung im Zugstab zu

$$\sigma = N/A = 11,0 \text{ kN/cm}^2.$$

Mit der Stablänge  $l$  von 5,20 m und der Steifigkeit von Edelstahl (17.000 kN/cm<sup>2</sup>) ergibt sich ein Dehnweg und somit das erforderliche Lagerspiel nach innen zu

$$\delta u_{xi} = 3,4 \text{ mm}.$$

Infolge der Regellastfälle ist also für das Lagerspiel nach außen der Wert  $\Delta u_{xa} = 4,4 \text{ mm}$  und für das Lagerspiel nach innen der Wert  $\delta u_{xi} = 3,4 \text{ mm}$  vorzusehen.

### 5.6.2 Erforderliches Lagerspiel und Beanspruchung der Unterkonstruktion aus dem Lastfall Resttragfähigkeit

Die Beanspruchungen im Lastfall Resttragfähigkeit werden aus den Bauteilversuchen für die Bauvorhaben in Wasseralfingen und Heidenheim [Bucak, Schuler; 2002], [Bucak, Koch; 2003] abgeleitet.

Vorab einige Angaben zum Versuch der Resttragfähigkeit und zum Verhalten der Bogenglasscheiben. Für den Versuch der Resttragfähigkeit sind die Prüfkörper flächig mit dem Eigengewicht und der halben Schneelast belastet. Nach dem Zerstören der ersten ESG-Scheibe bleibt der Glasbogen stabil. Ein Versagen des Glasbogens tritt erst nach dem Zerstören der zweiten ESG-Scheibe ein. Die Glasscheibe fällt auf die Zugstäbe und hängt sich auf diese.

Der Durchhang der Zugstäbe wird dadurch ermöglicht, dass sich der Abstand zwischen den Glasauflagern im Resttragfähigkeitsfall verringert.

Zum einen neigen sich die Glashalter im Resttragfähigkeitsfall durch die exzentrische Lagerung unterhalb der Zugstäbe so, dass die Zugstäbe durchhängen und zum andern wird der Durchhang der Zugstäbe durch das Lagerspiel der Glashalter ermöglicht.

Nachdem das Lagerspiel aufgebraucht ist, entsteht eine Straffung der Zugstäbe und ein Abbremsen der fallenden Glasscheibe. Das Herabfallen der Glasscheibe klingt in einem Schwingungsvorgang ab.

Die größte Beanspruchung des Zugstabes und damit auch der Unterkonstruktion erfolgt unmittelbar nach dem ersten Anschlag der Glashalter am Lager. Die Masse der Glasscheibe, die Größe des Lagerspiels und die Nachgiebigkeit der Unterkonstruktion haben wesentlichen Einfluss auf die Beanspruchung der Zugstäbe und Unterkonstruktion.

Zunächst eine Systembeschreibung der Loggia Wasseralfingen (Spannweite  $l = 5,40$  m; Glasdicke  $2 \times 12$  mm, Schneelast  $0,53$  kN/m<sup>2</sup>):

Lagerspiel  $\Delta u_{xs1} = 5$  cm =  $l/108$

Horizontalverschiebung aus Glashalterverdrehung  $\Delta u_{xs2} = 2 \cdot 2$  cm =  $l/135$

Durchhang  $f_s' = 43$  cm

Statische Zugstabkraft nach Ausschwingvorgang  $K_{zs1} = 9,5$  kN

Nachdem das System wieder in Ruhe ist, entspricht die Kraft in den Zugstäben der Seilkraft unter Gleichlast ( $H = q l^2 / (8 f') = 9,5$  kN). Es hat sich gezeigt, dass keine nennenswerten plastischen Deformationen an der Unterkonstruktion aufgetreten sind.

Während des Durchschlagens des Glasbogens wurden folgende Daten ermittelt:

Maximale Horizontalverschiebung der Lager (Lagerspiel plus elastische Verformung der Unterkonstruktion)  $\Delta u_{xd} = 17$  cm =  $l/108 + l/67 + l/135$

Durchhang  $f_d' = 59$  cm

Dynamische Zugstabkraft nach erstem Anschlag an das Lager  $K_{zd1} = 24$  kN

Vergleicht man die Statische mit der dynamischen Zugstabkraft, so beträgt das Verhältnis

$$K_{zd1} / K_{zs1} = 24 \text{ kN} / 9,5 \text{ kN} = 2,53$$

Analog die Systembeschreibung des Glasbogens bei dem ZOH Heidenheim (Spannweite  $l = 3,90$  m; Glasdicke  $2 \times 10$  mm, Schneelast  $0,62$  kN/m<sup>2</sup>):

Statische Zugstabkraft nach Ausschwingvorgang  $K_{zs2} = 7,5$  kN

Dynamische Zugstabkraft nach erstem Anschlag an das Lager  $K_{zd2} = 18$  kN

Die Unterkonstruktion im Resttragfähigkeitsversuch für den ZOH Heidenheim war weicher, als jene für die Loggia Wasseralfingen. Die dynamische Erhöhung betrug nur:

$$K_{zd2} / K_{zs2} = 18 \text{ kN} / 7,5 \text{ kN} = 2,4$$

Da die Geometrie der Glasbögen im Grundsatz immer gleich ist, wird, orientiert an diesen Ergebnissen, folgender allgemeiner Ansatz verfolgt:

- Das Lagerspiel nach innen  $\Delta u_{xi}$  wird auf mindestens  $l/100$  festgelegt.
- Die Unterkonstruktion muss die dynamische Zugstabkraft  $K_{zd} = 2,6 \cdot K_{zs}$  mit einer auf 1,0 reduzierten Sicherheit abtragen können.

- Die Unterkonstruktion muss unter der dynamischen Zugstabkraft  $K_{zd}$  eine elastische und/oder plastische Deformation von mindestens  $l/60$  ermöglichen.

Aufgrund der Erhöhung der statischen Zugstabkraft  $K_{zs}$  um den Faktor 2,6 auf die dynamische Kraft  $K_{zd}$  erübrigt sich der Nachweis der Unterkonstruktion unter der statischen Zugstabkraft.

Für die Bögen mit einer Spannweite  $l = 5,20$  m bedeutet dies ein Lochspiel von 5,2 cm, eine Verschiebung aus der Glashalterverdrehung von 3,85 cm und eine elastische Verformung der Unterkonstruktion von 8,7 cm.

Die auf die Unterkonstruktion wirkenden Kräfte betragen:

$$K_{zs} = q l^2 / (8 f') = 11,5 \text{ kN}$$

$$K_{zd} = 2,6 q l^2 / (8 f') = 29,9 \text{ kN}$$

$$q = g + s / 2 = (0,6 \text{ kN/m}^2 + 0,5 \cdot 1,15 \text{ kN/m}^2) 1,30 \text{ m} = 1,53 \text{ kN/m}$$

$$f' = \sqrt{\left(\frac{l}{l_r} - 1\right) \cdot \frac{3}{8} \cdot l_r^2} = 0,417 \text{ m}$$

$$l_r = l - 0,052 \text{ m} - 0,0385 \text{ m} = 5,11 \text{ m}$$

$$l = 5,20 \text{ m}$$

### 5.6.3 Festlegung des Lagerspiels

Das erforderliche Lagerspiel nach außen erf.  $\Delta u_{xa}$  wird, orientiert am zweifachen Wert aus Tabelle 8, mit 10mm festgelegt. Dies wird aus konstruktiven Gründen für alle Bogenglastypen so gewählt. Für das erforderliche Lagerspiel nach innen erf.  $\Delta u_{xi}$  wird der Fall der Resttragfähigkeit und nicht die abhebende Belastung maßgebend. Es wird wie oben beschrieben mit  $l/100 = 52\text{mm}$  festgelegt.

## 5.7 Minimale Spannweite

Um die Möglichkeit zu haben auch kleinere Scheiben bauen zu können, wird untersucht ob die zulässigen Spannungen eingehalten werden, wenn die Spannweite bis zur maximalen Spannweite der nächst dünneren Glasdicke verringert wird.

Wird die Spannweite und die Stichhöhe unter Beibehaltung von  $l/16$  verringert, so erhöht sich die Spannung aus Vorkrümmung im Glas.

Maßgebend ist die Spannungserhöhung in den einzelnen Scheiben, da der Verbund der Scheiben im Vorkrümmungsprozess eine untergeordnete Rolle spielt.

Um den Einfluss an der Einzelscheibe allgemein zu erklären, muss man die Funktion des Bogens untersuchen.

Wie schon erläutert, entspricht die Bogenform in etwa der Sinusfunktion:



$$w = \frac{l}{16} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{l}\right)$$

x bezeichnet dabei die Laufkoordinate am Bogen.

Ausgehend von der zweiten Ableitung der Bogenform ergibt sich die Spannung wie folgt:

$$\sigma = w'' \cdot E \cdot \frac{t}{2}$$

mit

$$w'' = \frac{-\pi^2}{16 \cdot l} \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{x}{l}\right)$$

Für eine Spannweite l von 5200 mm ergibt sich an der Stelle  $x = l/2$  damit die Spannung von 49,4 N/mm<sup>2</sup>.

Für eine Spannweite l von 4310 mm ergibt sich an der Stelle  $x = l/2$  damit die Spannung von 59,6 N/mm<sup>2</sup>. Die Glasspannungen sind also bei der kleineren Scheibe um 10,2 N/mm<sup>2</sup> größer.

Wird diese Spannung zu jener im maßgebenden Vollastfall nach Kapitel 5.3.2 addiert ergibt sich näherungsweise und auf der sicheren Seite liegend die Spannung für eine Spannweite l von 4310 mm zu:

$$\sigma_{v,d} = 64,0 \text{ N/mm}^2 + 10,2 \text{ N/mm}^2 = 74,2 \text{ N/mm}^2$$

Der Bemessungswert der Spannungen  $\sigma_{R,d} = 81,6 \text{ N/mm}^2$  wird eingehalten.

Diese Abschätzung liegt auf der sicheren Seite, da die Systemsteifigkeit bei geringerer Spannweite des Bogenglases größer wird und die Verformungen und Spannungen aus Theorie zweiter Ordnung somit geringer werden.

## 5.8 Berechnung der Bögen mit Glasstärken von 2 mal 10mm, 2 mal 8mm, 2 mal 6mm, 2 mal 5mm, und 2 mal 4mm

Bei den Berechnungen der Glasbögen mit der Glasstärke 2 x 12mm hat sich herausgestellt, dass die Rechnung mit abgeminderter Glassteifigkeit („Bogen 1216“) maßgebend ist. Dementsprechend wird für die Glasbögen mit geringerer Glasstärke nur noch diese Berechnung durchgeführt.

Um dennoch die Spannungen im Vollastfall auf Bemessungsniveau korrekt anzugeben, werden die Spannungswerte wie in Kapitel 5.3.2 dargestellt um 12% erhöht. Die Bemessungskraft des Zugstabes wird aus demselben Grund entsprechend Kapitel 5.4 korrigiert.

Die Spannweite der Bogengläser ist jeweils so gewählt, dass die Knicklast gerade noch über der Volllast liegt. Mit diesem Ansatz sind immer die maximale Schlankheit und die minimale Eigenspannung aus Vorkrümmung im Glas vorhanden.

Die Ergebnisse der Berechnung werden im folgenden Kapitel zusammengefasst.

## Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

Tabelle 9: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

		Bogenglastyp					
		12/5200	10/4310	8/3500	6/2650	5/2200	4/1800
<b>Eigengewicht (char. Last)</b>							
Max. Vergleichs- spannung $\sigma_v$	[N/mm <sup>2</sup> ]	46,3	45,7	44,5	43,3	44,0	41,1
Schubwinkel $\gamma = u/fo$	[-]	1,21	1,16	1,13	0,80	0,88	0,71
hor. Lager- verschiebung $u_x$	[mm]	48,5	39,8	32,5	24,4	21,0	16,3
<b>Knicklast</b>							
Flächenlast beim Knicken $q_{ki}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	2,67	2,79	2,66	2,52	2,39	2,32
Max. Vergleichs- spannung $\sigma_v$	[N/mm <sup>2</sup> ]	60,7	58,0	55,3	54,7	52,1	54,7
<b>Volllast (<math>\gamma</math>-fache Last)</b>							
Max. Vergleichs- spannung $\sigma_v$	[N/mm <sup>2</sup> ]	57,6	53,7	51,6	50,6	49,1	49,4
$\sigma_v \cdot 1,12$	[N/mm <sup>2</sup> ]	64,0	60,1	57,8	56,6	54,9	55,3
Spannungserhöh. kurze Scheibe $\Delta\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,1	11,5	15,4	9,8	10,5	6,4
$\sigma_v \cdot 1,12 + \Delta\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	74,1	71,6	73,2	66,4	65,4	61,7
Auflagerkraft $A_{d,v}$	[kN]	8,8	5,7	3,6	1,9	1,3	0,9
Zugstabskraft $N_d$	[kN]	46,9	30,8	19,0	10,3	6,9	4,6
Differenz Zugstabskraft $\Delta N_{ki}$	[kN]	1,8	1,3	0,8	0,4	0,3	0,2
Bemessungslast Zugstab + Glashalter $N_d' = N_d + \Delta N_{ki}$	[kN]	48,7	32,1	19,8	10,7	7,2	4,8
Ausnutzung Zugstab	[%]	97	87	77	42	44	29
Hebelarm im Glashalter	[mm]	24,1	20,9	17,7	14,7	12,5	10,5
Ausnutzung Glashalterblech	[%]	95	71	56	47	48	47
Pressung im Hilti Hit	[N/mm <sup>2</sup> ]	32,52	25,72	22,12	20,64	19,46	16,26
hor. Lager- verschiebung $u_x$	[mm]	44,1	35,4	29,3	22,2	18,9	15,1
Lagerverschiebung Volllast – Eigengewicht $\Delta u_{xa}$	[mm]	-4,4	-4,4	-3,2	-2,2	-2,1	-1,2

		Bogenglastyp					
		12/5200	10/4310	8/3500	6/2650	5/2200	4/1800
<b>Abhebende Last (<math>\gamma</math>-fach)</b>							
Max. Vergleichs- spannung $\sigma_v$	[N/mm <sup>2</sup> ]	43,4	40	48	48,5	42,7	51,4
<b>Resttragfähigkeit</b>							
hor. statische Kraft am Lagerpunkt der Glasbögen $K_{zs}$	[kN]	12,52	7,86	4,70	2,42	1,57	0,99
hor. dynamische Kraft am Lagerpunkt der Glasbögen $K_{zd}$	[kN]	32,54	20,45	12,21	6,29	4,09	2,58
erf. elastische und/oder plastische Deformations- fähigkeit der Unterkonstruktion unter Ansatz von $K_{zd}$	[mm]	87	72	58	44	37	30
<b>Lagerspiel der Bogengläser (ist an einer der beiden Auflagerseiten oder alternativ an beiden Auflagerseiten je zur Hälfte vorzuhalten)</b>							
erf. Lagerspiel nach außen erf. $\Delta u_{xa}$	[mm]	10	10	10	10	10	10
erf. Lagerspiel nach innen erf. $\Delta u_{xi}$	[mm]	52	43	35	26	22	18

In Tabelle 9 werden die Berechnungsergebnisse für alle Bogenglastypen zusammengefasst. Bei der Anwendung der Tabelle sind die Ausführungen in Kapitel 5 zu beachten.

## 6 Literatur

Breuninger, U.; Stumpf, M.: Cold bent Arches of laminated Glass; Conference Proceedings; International Symposium on the Application of Architectural Glass; Technische Universität München, Universität der Bundeswehr München; 2004.

Breuninger, U.; Stumpf, M.; Fahlbusch, M.: Tragstruktur der Loggia in Wasseraufingen; Bautechnik 80; 2003.

Bucak, Ö.; Schuler, C.: Prüfbericht Nr.: 2002 – 3024, Versuchstechnische Untersuchung von gebogenen Glaselementen aus Verbundsicherheitsglas aus 2 x 12 mm Einscheibensicherheitsglas; FH München, Fachbereich 02 Bauingenieurwesen / Stahlbau; 2002.

Bucak, Ö.; Koch, S.: Prüfbericht Nr.: 2003 – 3058, Tragfähigkeits- und Resttragfähigkeitsuntersuchungen an gebogenen Verbundsicherheitsgläsern aus Einscheibensicherheitsglas; FH München, Fachbereich 02 Bauingenieurwesen / Stahlbau; 2003.

Sobek, W.; Kutterer, M.; Messmer, R.: Untersuchungen zum Schubverbund bei Verbundsicherheitsglas – Ermittlung des zeit- und temperaturabhängigen Schubmoduls von PVB; Bauingenieur 75; 2000.

Stumpf, M.: Loggia Wasseraufingen, gebogen gespanntes Glas; Glas im konstruktiven Ingenieurbau 3, Fachseminar und Workshop; FH München; 2002.

Weischede, D.; Fahlbusch, M.: Versuchsbericht: Untersuchung des Tragvermögens von PVB-Folie in VSG-Scheiben nach einer Schubverformung für das Bauvorhaben Wasseraufingen; TU-Darmstadt, Fachgebiet für Entwerfen und Tragwerksentwicklung; 2001.

Wesche, K.; Baustoffe für tragende Bauteile 4 Holz Kunststoffe; Bauverlag; 1988

Shen, X.; Wörner, J.: Entwicklungen eines Bemessungs- und Sicherheitskonzeptes für den Glasbau; Bauingenieur 73; 1998.

Sofistik: Handbuch Allgemeine Statik Finiter Element Strukturen; 2000.

Hilti HIT-HY50: Hilti Entwicklung Befestigungstechnik GmbH, Technisches Datenblatt, DECDmp 03/00, Druckfestigkeit nach EN ISO 604



## Anhang 2

# Untersuchung des Tragvermögens von PVB-Folie in VSG-Scheiben nach einer Schubverfor- mung

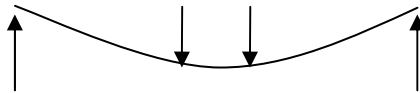
### Inhaltsverzeichnis

1.	Hintergrund.....	2
2.	Stand der Forschung.....	3
3.	Ziel und Untersuchungsprogramm .....	3
3.1.	Versuchsaufbau Relaxationsversuch .....	4
3.2.	Versuchsaufbau Scherfestigkeitsversuch .....	10
3.3.	Versuchsreihen .....	10
4.	Ergebnisse .....	11
5.	Diskussion der Ergebnisse.....	12
6.	Literatur .....	13

## 1. Hintergrund

Verbundsicherheitsglas besteht aus mehreren Lagen Floatglas oder ESG, welche durch Zwischenlagen aus PVB-Folie verbunden sind. Will man eine VSG-Scheibe in Bogenform biegen, so kann eine erhebliche Schubbelastung in der PVB Folie entstehen.

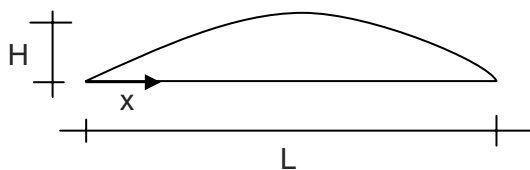
Im untersuchten Fall soll die Vorkrümmung der Verbundsicherheitsglas-Scheibe durch Belastung unter Eigengewicht bzw. als Dreipunkt-Biegebalken mit langsamer Laststeigerung erfolgen. Da die PVB-Folie thermoplastische Eigenschaften hat, wird der Probekörper erwärmt. Die Lasten werden langsam so gesteigert, dass die Spannungen in der Folie durch Kriechen abgebaut werden können.



**Abbildung 1: VSG-Scheibe unter Biegebeanspruchung zur Erzeugung der Bogenform**

Nach dem Aufbringen der Vorkrümmung wird die VSG-Scheibe mit Zugstäben in ihrer Form fixiert und abgekühlt. Der volle Schubverbund muss wieder hergestellt sein. Im Anschluss wird die VSG Scheibe 180° um ihre Längsachse gedreht, so dass sie als Bogen Lasten abtragen kann. Die Form des Bogens unter Eigenspannung entspricht weitgehend einer Sinuskurve.

Abweichungen entstehen durch den geringen Eigengewichtsanteil der Glasscheiben.



**Abbildung 2: Nach der Verformung gedrehte Glasscheibe mit Zugband.**

Sinusfunktion des Bogens:  $z = H \cdot \sin(180 \cdot x/L)$ .

Die Untersuchungen wurden für einen Glasbogen mit folgender Geometrie durchgeführt:

Höhe =  $H = 300 \text{ mm}$

Länge =  $L = 5400 \text{ mm}$

Durch die Vorkrümmung der zwei Glasscheiben (Dicke  $T_g = 11,8 \text{ mm}$ ) ergibt sich bei einer Durchbiegung von 30,0 cm über die Länge von 5,40 m in der Folie (Dicke der Folie  $T_f = 1,9 \text{ mm}$ ) ein Schubversatz. Dieser Schubversatz ist abhängig von dem Anfangswinkel der Glas-



scheibe. Für  $x=0$  ist der Winkel, abgeleitet aus der Biegelinie,  $z'=300 \text{ mm} \cdot \cos(x/5400 \text{ mm} \cdot 180^\circ) \cdot 180^\circ/5400 \text{ mm}=10^\circ$ . Daraus ergibt sich ein Schubversatz  $\gamma$  von  $(11,8 \text{ mm}+1,9 \text{ mm}) \cdot \tan(10^\circ)=2,41 \text{ mm}$ . Durch die aus dem Eigengewicht resultierende Abweichungen ist der wahre Schubversatz kleiner als er in dieser überschlägigen Berechnung (Schubwinkel  $\gamma = 2,41 \text{ mm}/1,9 \text{ mm}=1,27$ ) ermittelt wurde.

Die Folie muss diesen Schubversatz dauerhaft ertragen, ohne sich von der Glasscheibe abzulösen. Weiterhin soll die Folie insbesondere bei tiefen Temperaturen einen Schubverbund zwischen den Glasscheiben herstellen, da dann mit zusätzlichen Lasten aus Schnee zu rechnen ist.

Die Untersuchungen des Schubverhaltens der Folie wurden im Prüflabor der HT-Troplast AG mit einer PVB-Folie von Trosifol durchgeführt.

## 2. Stand der Forschung

Sobek, Kutterer und Messmer führten Untersuchungen zum rheologischen Verhalten von PVB im Schubverbund bei  $-20^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $55^\circ$  und  $70^\circ\text{C}$  durch [1].

Die Versuche ergaben, dass PVB-Folien mit zunehmender Temperatur schubweicher werden und dass der plastische Anteil an der Verformung bei höheren Temperaturen zunimmt. Der Verbund Glasscheibe–PVB blieb bei einer kurzzeitigen Belastung und einer Temperatur von  $40^\circ\text{C}$  bis zu einem Schubwinkel von  $\gamma = 1,25$  [-] intakt. Bei größeren Schubwinkeln und Versuchstemperaturen von  $\geq 40^\circ\text{C}$  traten mehrfach Ablösungen der Folie vom Glas auf. Die Kriechversuche unter  $1 \text{ N/mm}^2$  Dauerlast ergaben, dass nach 14 Tagen entweder annähernd das Endkriechmaß erreicht worden war, oder die Probekörper versagt hatten.

## 3. Ziel und Untersuchungsprogramm

Zur Vorbereitung der Vorverformung der Glasscheiben musste die Temperatur ermittelt werden, bei der die Folie während dieses Prozesses nicht beschädigt wird, keine Ablösung von der Glasscheibe eintritt und die Restschubspannungen minimal sind.

Im einzelnen ist zu untersuchen:

- wie groß der Abbau der Schubspannungen in der Folie nach einer Schubvorverformung in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur ist.
- ob der Verbund Glas–PVB nach der Schubverformung dauerhaft gewährleistet ist.
- ob die PVB-Folie nach der Schubvorverformung eine Vorschädigung aufweist, und
- wie das Tragverhalten im Vergleich zu einer Verbundglasscheibe ohne Vorverformung ist.

### **3.1. Versuchsaufbau Relaxationsversuch**

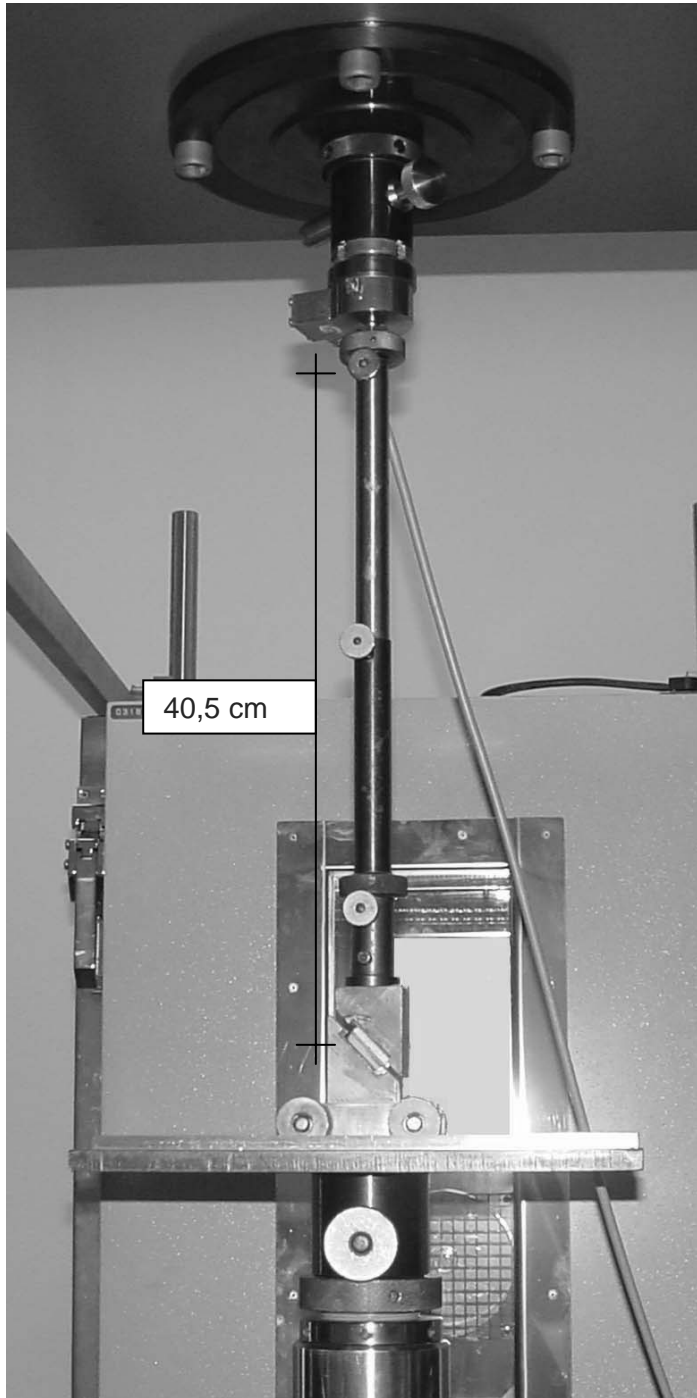
Zur Untersuchung des Relaxationsverhaltens der PVB--Folie wird der Versuchsaufbau des Standard-Kompressionsschertests in abgewandelter Form eingesetzt.

Bei diesem Standard-Versuchsaufbau wird der VSG-Probekörper unter einem Winkel von  $45^\circ$  zu einer vertikalen Last eingebaut. Die vertikale Last ist horizontal unverschieblich, der Wagen, der den Versuchsaufbau trägt, kann sich hingegen in horizontaler Richtung bewegen. Wird der Probekörper belastet, so werden neben den Normalkräften durch die horizontale Verschieblichkeit auch Querkräfte in der Folie erzeugt. Im Standard- Versuchsaufbau wird der Probekörper bis zum Versagen mit einer konstanten Geschwindigkeit belastet. Die Versuchsergebnisse dienen zur Qualitätskontrolle bei der Herstellung von PVB.

Um das Relaxationsverhalten von PVB zu untersuchen, wurden die Probekörper bis zu einem Schubwinkel von  $1,71[-]$  mit konstanter Geschwindigkeit belastet, anschließend wurde die Relaxation bei gleichbleibendem Schubversatz aufgezeichnet.

Zur Vermeidung von Messungenauigkeiten, die vom Rollwiderstand des Wagens herrühren, wurde dieser blockiert. Der untere Wegaufnehmer wird dadurch überflüssig. Die Lasteinleitung in den oberen Teil des Versuchsaufbaus erfolgt über einen, an der Druckmessdose gelenkig und am Prüfaufbau starr angeschlossenen, 40,5 cm langen Stab. Der bei der Belastung auftretende Weg von 1,45 mm in horizontaler Richtung ist so klein, dass die Winkelverdrehung in der Folie von  $0,22^\circ$  zu vernachlässigen ist. (vgl. Abbildung 1)

Der horizontale Weg wurde von einem Wegaufnehmer und die vertikalen Wege von der Prüfmaschine aufgezeichnet. (vgl. Abbildung 2)



**Abbildung 3: Versuchsaufbau Relaxationsversuch**

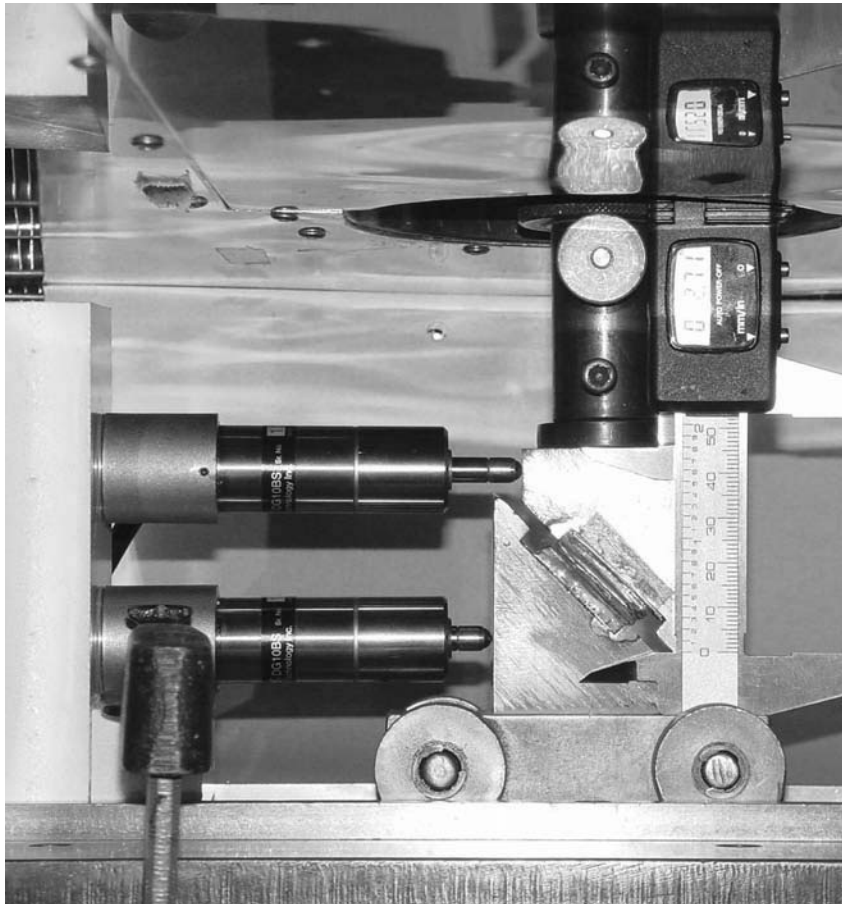
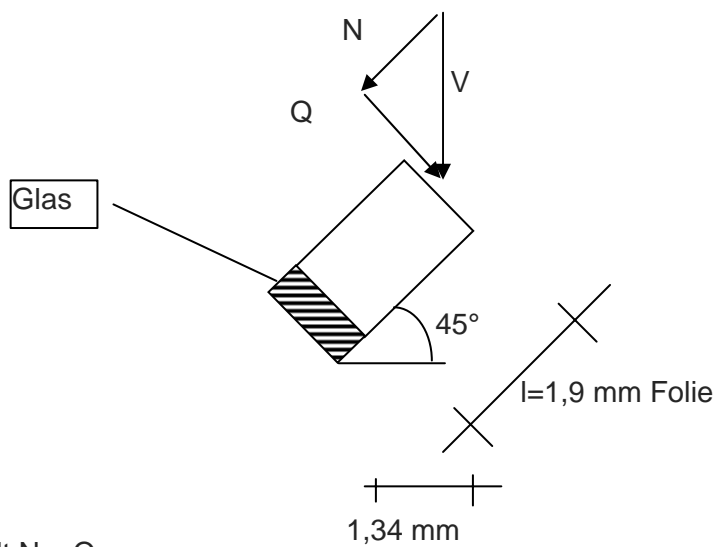


Abbildung 4 Versuchsaufbau Relaxationsversuch, Wegaufnehmer

Berechnung der vertikalen Verschiebung bei einem Schubwinkel von 1,71 [-]



Für 45 ° gilt  $N = Q$

$$\frac{N}{A} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

$$\frac{Q}{A} = \gamma \cdot G$$

$\Delta l$  = Stauchung infolge N

## Anhang 2

$$\gamma = \text{Schubwinkel} = 1,71 \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad \mu = 0,49 [1]$$

$$G \approx \frac{E}{3}$$

Durch Gleichsetzen der Formeln für N und A erhält man:

$$\Delta l = \frac{\gamma \cdot l}{3} = 1,083 \text{ mm}$$

Die gesamte Vertikalverschiebung würde bei einer Berechnung ohne Berücksichtigung großer Verformungen

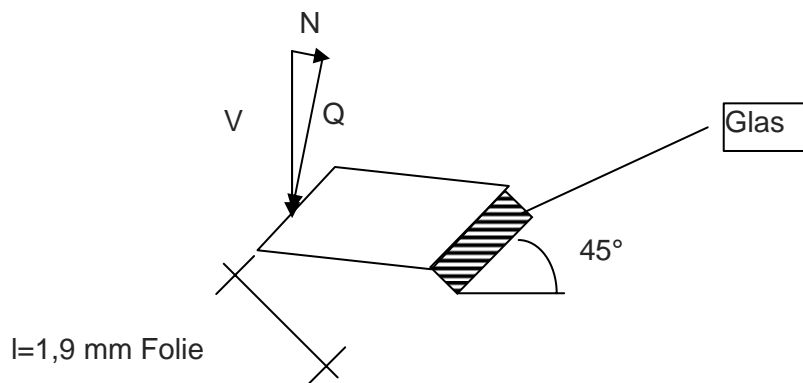
$$(\gamma \cdot (l - \Delta l) + \Delta l) / \sqrt{2} = 1,75 \text{ mm}$$

betragen.

Für die Horizontalverschiebung ergäbe sich

$$(\gamma \cdot (l - \Delta l) - \Delta l) / \sqrt{2} = 0,22 \text{ mm}$$

Bei großen Verformungen nimmt die Normalkraftkomponente in der PVB ab, d.h. dass die Stauchung im Verhältnis zu Verschiebung kleiner wird. Für  $\gamma = 1$  ist  $N = 0$ , d.h. es liegt eine reine Schubverzerrung vor. Für  $\gamma = 1,71$  wirkt N sogar entgegengesetzt auf Zug. Die horizontale Verformung wird aber von der horizontalen Komponente von Q überdeckt.



## Anhang 2

Bei einer vertikalen Verschiebung von 2,07 mm ergibt sich unter Berücksichtigung der großen Verformungen eine horizontale Verschiebung von 1,45 mm. Der Schubversatz lässt sich näherungsweise anhand der Dreiecksgeometrie wie folgt errechnen.

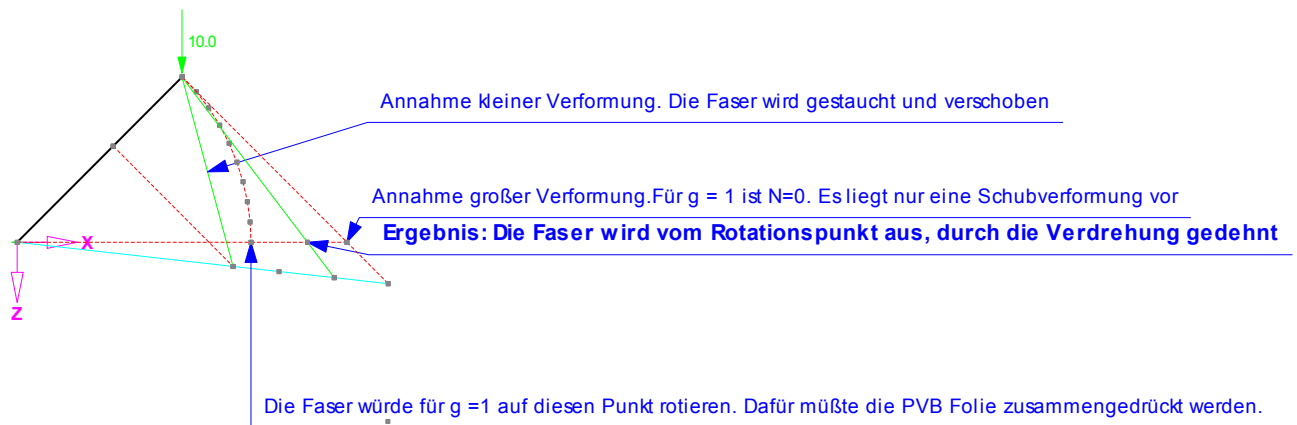
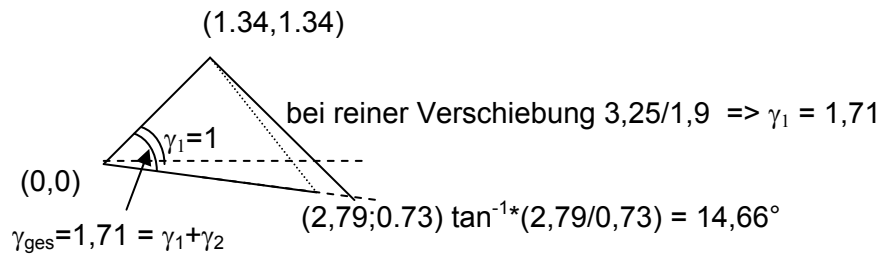


Abbildung 5: Grafik zur Veranschaulichung der Verformungseinflüsse

## Anhang 2

In der Tabelle werden die tatsächlich gemessenen Verformungen dargestellt. Anschließend wird aus diesen Werten der Schubwinkel ermittelt.

	Knotenkoordinate Ausgangszustand	Verschiebung u [mm]	Knotenkoordinate verformter Zustand $\Delta u$
x [mm]	1,34	1,45 (Mittelwert)	2,79
z [mm]	1,34	2,07 (Maschinenweg)	0,73

Die Verschiebung geschieht um dem Punkt 0,0

Damit lässt sich der Winkel errechnen:

$$\alpha_1 = 45^\circ$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}(0,73/2,79) = 14,66^\circ$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 59,66^\circ$$

Es ergibt sich ein theoretischer Gesamtverschiebungsweg ohne Stauchung von:

$$\tan(59,66) = 3,25 \text{ mm}$$

Damit ergibt sich ein Schubwinkel  $\gamma$ :

$$\gamma = \tan(59,66) \cdot 1,9/1,9 = 1,71[-]$$

Der tatsächliche Weg beträgt:  $\sqrt{(1,46^2 + 2,07^2)} = 2,53 \text{ mm}$

### 3.2. Versuchsaufbau Scherfestigkeitsversuch

Zur Untersuchung der Scherfestigkeit wurden die Probekörper, die zuvor im Relaxationsversuch eingesetzt worden waren sowie Referenzprobekörper mit einem Standard-Kompressionsschertest bis zum Bruch belastet. Die Resttragfähigkeit wurde bei 23 °C mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 mm/min in Scherrichtung untersucht. Neben der Bruchlast wurde auch die dazu gehörige Verschiebung in Abhängigkeit von Kraft und Zeit aufgezeichnet.

### 3.3. Versuchsreihen

Die Probekörper werden vor und nach der Belastung vermessen. Der bleibende Schubversatz wird dokumentiert.

Die Verformung wird bei dem Schubwinkel von 1,71 gehalten und die Relaxation über 15,7 h aufgezeichnet.

Temperatur	Belastungsgeschwindigkeit	Versuchsnummern
40° C	0,03 mm/s	V2, V3, V4, V7
40°C	0,1 mm/s	V5, V6
57°C	0,03 mm/s	V8, V9, V10, pr1, pr2, pr3
23° C	0,03 mm/s	V11, V12, V13

Zur Feststellung ob durch die Schubbeanspruchung eine Schwächung des Verbundes eingetreten ist wurden alle Probekörper und die Referenzprobekörper V17, V18, V19, pr4, pr5, pr6 nach Abschluss der Relaxationsversuche bei 23° C und mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 mm/min abgesichert.

Die Probekörper mit der Bezeichnung V wurden bei Trosifol unter Laborbedingungen hergestellt. Probekörper mit der Bezeichnung pr wurden von der Firma Eckelt unter den gleichen Bedingungen wie die Glasscheiben der Überdachung in Wasseralfingen hergestellt.



#### 4. Ergebnisse

Um die Vergleichbarkeit der einzelnen Versuchsergebnisse zu gewährleisten werden im Folgenden die Vertikalkräfte immer auf die Gesamtfläche der Probekörper bezogen. Diese Kombination der Normal- und Schubspannung in der Folie entspricht bei kleinen Schubwinkeln der Hauptspannung und wird in der Regel bei den Kompressionsschertests als Versuchsergebnis ermittelt.

Spannungen aus einem Schubversatz von 1,71 [-]:

	Hauptspannung bei einer Belastungsbeschwindigkeit von		Hauptspannungen nach	Bleibender Weg nach
	0,03 mm/min	0,1 mm/min	15,7 h	15,7 h
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm
40°C	0,33	0,43	0,16	0,4
57°C	0,13		0,0435	1,6
23°C	0,67		0,39	0,1

Weitere Ergebnisse sind in folgenden xls-Dateiausdrucken angefügt:

Glas.xls „Spannungen in der Folie“

Glas.xls „Relaxation von PVB-Folie bei verschiedenen Temperaturen“

Glasrest.xls „Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen“

Glasrest.xls „Bruchspannungen“

Werden die Glasscheiben bei 57 °C gebogen und 15,7 h gelagert so ergibt sich eine Restspannung von 0,0318 N/mm<sup>2</sup> in der Folie.

## 5. Diskussion der Ergebnisse

Wird die Glasscheibe bei einer Temperatur von 57 °C gebogen und über 15,7 h stehen gelassen, so bleibt eine mittlere Restspannung in der Folie  $F/A = 0,0435 \text{ N/mm}^2$ . Unter Annahme eines linearen Zusammenhanges zwischen Spannung und Weg kann aus dieser Restspannung und dem Schubwinkel von 1,71 ein Schubmodul von  $0,018 \text{ N/mm}^2$  ermittelt werden.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{0,0435 \text{ N/mm}^2}{\sqrt{2} * 1,71} = 0,018 \text{ N/mm}^2$$

Die Federsteifigkeit lässt sich dann mit

$$k_x = \frac{Q}{u_x} = \frac{A * G}{t}$$

berechnen.

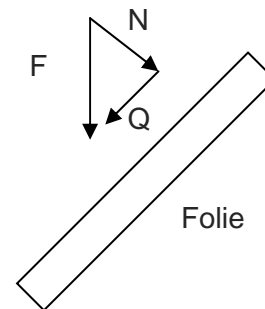
Q = Schubkraft

$u_x$  = Verschiebung

A = Einflussfläche der Folie

t = Dicke der Folie und

G = Schubmodul



Bei einer Elementgröße von 25 cm x 25 cm ergibt sich eine Federsteifigkeit von 592 [N/mm].

Keiner der Probekörper delaminierte bei der Schubverformung. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei korrekter Laminierung der Glasscheiben keine Gefahr der Delaminierung besteht.

Bei den Untersuchungen mit dem Standardkompressionsschertest zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen Probekörpern mit Schubvorverformung im Gegensatz zu den Referenzprobekörpern. Somit wurde auch gezeigt, dass die Schubvorverformung weder eine Beschädigung der Folie noch eine Beeinträchtigung des Verbundes mit den Glasscheiben mit sich bringt.

## **6. Literatur**

[1] Sobek, Werner; Kutterer, Mathias; Messmer, Rolf: „Bauen mit Glas Reologisches Verhalten von PVB im Schubverbund“. Forschungsbericht 4/98, Institut für leichte Flächentragwerke.

Spannung in der Folie ~~R~~oben Trosifol

Relaxationsversuchs Nr.		1	2	3	4	7	Mittelwerte ohne V1	5	6	Mittelwert 40 C
Belastungsgeschwindigkeit	[mm/min]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		0,1	0,1	
Temperatur		40°C	40°C	40°C	40°C	40°C		40°C	40°C	
Fläche A	[mm²]	667	624	615	637,84	629,71		644,91	637,95	
Fmax	[N]	161,00	194,00	212,00	210,00	208,00	<b>206,00</b>	261,00	286,00	273,50
F(15,7h) 5,66E4[s]	[N]		9,90E+01	1,08E+02	1,02E+02	9,47E+01	<b>100,96</b>	103,00	97,90	100,45
sigma=Fmax/A	[N/mm²]	0,24	0,31	0,34	0,33	0,33	<b>0,33</b>	0,40	0,45	0,43
sigma=F(15,7)/A	[N/mm²]	0,00	0,16	0,18	0,16	0,15	<b>0,16</b>	0,16	0,15	0,16
tau=Fmax/(A*sqrt2)	[N/mm²]	0,17	0,22	0,24	0,23	0,23	<b>0,23</b>	0,29	0,32	
tau=F(15,7)/(A*sqrt2)	[N/mm²]	0,00	0,11	0,12	0,11	0,11	<b>0,11</b>	0,11	0,11	0,11
Schubweg u	[mm]	3,249	3,249	3,249	3,249	3,249	<b>3,25</b>	3,25	3,25	2,38
Schubmodul max G	[N/mm²]	0,10	0,13	0,14	0,14	0,14	<b>0,1360</b>	0,17	0,19	0,00
<b>Schubmodul min G</b>	<b>N/mm²</b>		<b>0,07</b>	<b>0,07</b>	<b>0,07</b>	<b>0,06</b>	<b>0,0667</b>	<b>0,07</b>	<b>0,06</b>	<b>0,09</b>
Länge l	[mm]	2750	2750	2750	2750,00	2750,00	<b>2750,00</b>	2750,00	2750,00	Anhang 2
Federsteifigkeit f	[N/mm/mm²]	0,05	0,07	0,08	0,07	0,07	<b>0,07</b>	0,09	0,10	
Federsteifigkeit fmin	[N/mm/mm²]		0,03	0,04	0,03	0,03		0,03	0,03	
Schubkraft 1/2*l*F*u/l	N	0,09	0,11	0,12	0,12	0,12	<b>0,12</b>	0,14	0,16	
Elementgrösse 25²cm²	m²	62500	62500	62500	62500	62500	<b>62500</b>	62500	62500	62500
Elementgrösse 5²cm²	m²	2500	2500	2500	2500	2500	<b>2500,00</b>	0,0025	0,0025	
Federsteifigkeit f 25²	kN/m	3283,34	4228,95	4692,44	4478,42	4493,00	<b>4473,20</b>	5505,03	6098,15	
Federsteifigkeit f 25²min	kN/m		2158,07	2393,78	2175,23	2045,61		2172,48	2087,44	
Federsteifigkeit f 5²	kN/m	131,33	169,16	187,70	179,14	179,72		0,00	0,00	
Scherfestigkeitsversuchs Nr.			V23	V24	V25	V28		V26	V27	
Scherfestigkeit	[N]		5371	6765	5518	5611	<b>5816</b>	6146	6875	6510
Hauptscherspannung	[N/mm²]		8,60	11,01	8,65	8,91	<b>9</b>	9,53	10,78	10

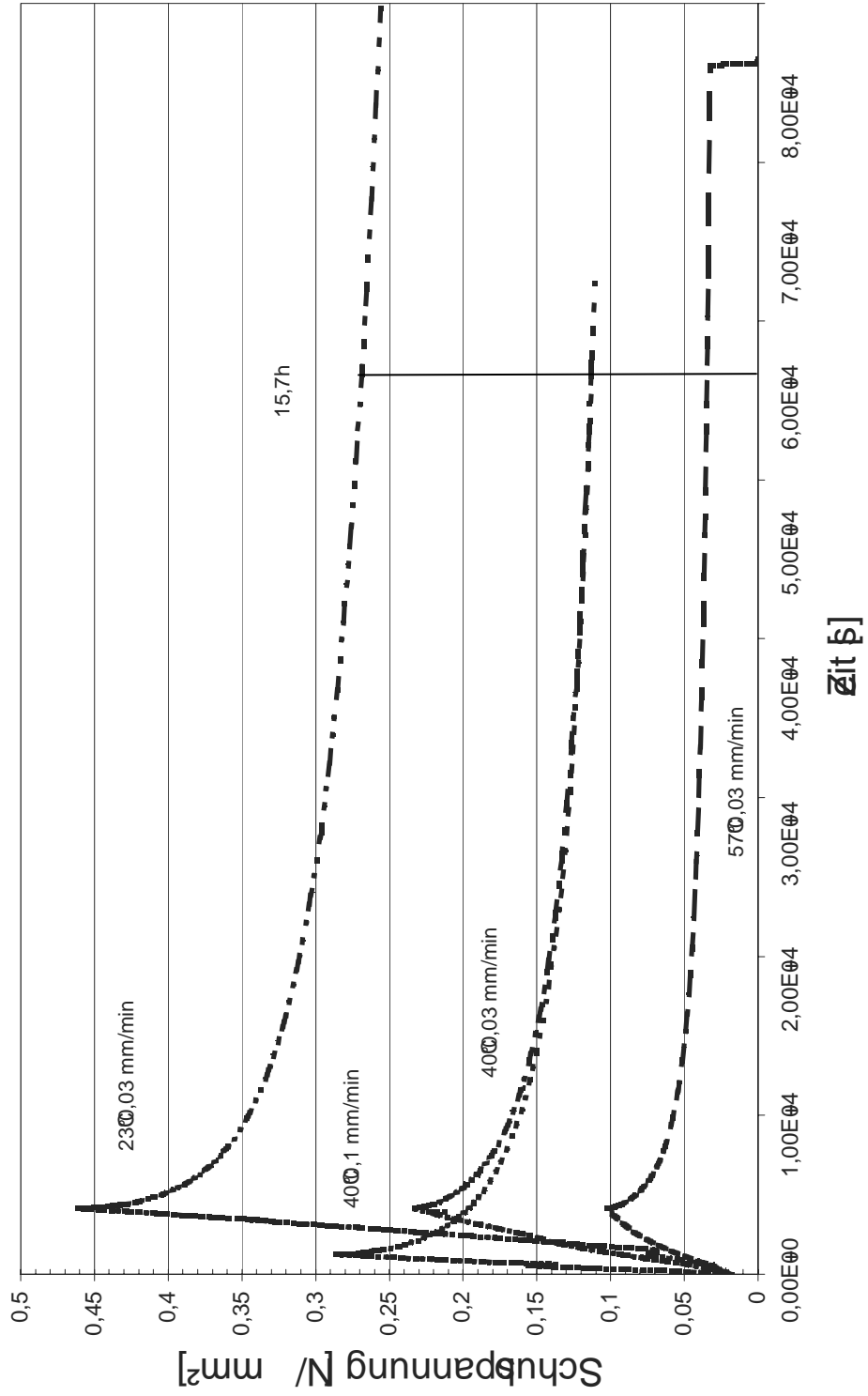
Spannung in der Folie ~~Roben~~ Trosifol

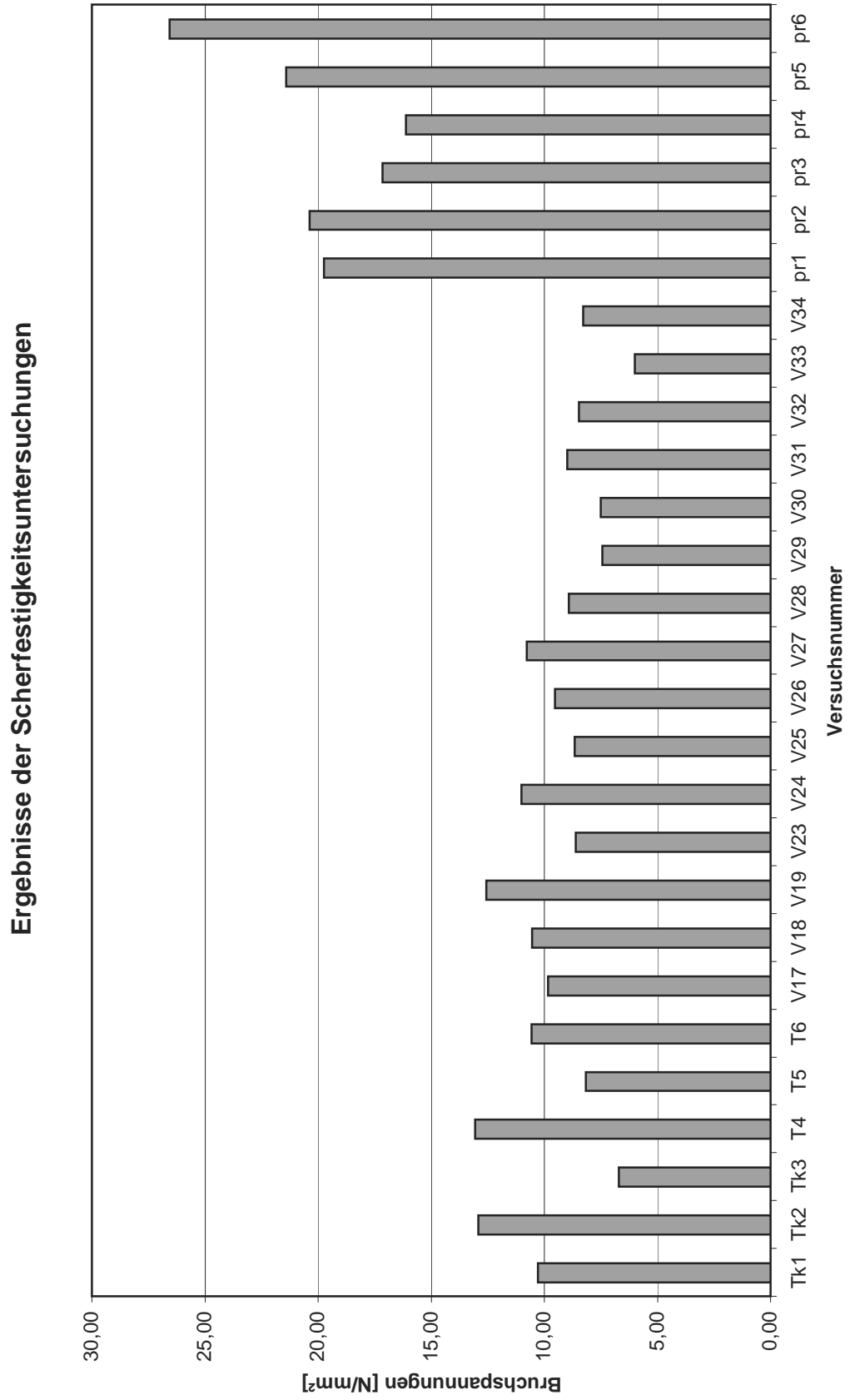
Relaxationsversuchs Nr.		8	9	10	Mittelwerte aus	11	12	13	Mittelwerte aus
Belastungsgeschwindigkeit	[mm/min]	0,03	0,03	0,03	<b>0,03</b>	0,03	0,03	0,03	23C
Temperatur		57°C	57°C	57°C		23°C	23°C	23°C	
Fläche A	[mm²]	655,7622	649,467	675,1552	<b>660,13</b>	647,0492	668,9676	658,6922	
Fmax	[N]	78,40	75,30	70,60	<b>74,77</b>	414,00	435,00	457,00	446,00
F(15,7h) 5,66E4[s]	[N]	26,40		23,50	<b>24,95</b>	351,00	254,00	263,00	258,50
sigma=Fmax/A	[N/mm²]	0,12	0,12	0,10	<b>0,11</b>	0,64	0,65	0,69	0,67
sigma=F(15,7)/A	[N/mm²]	0,04		0,0348	<b>0,0375</b>	0,54	0,38	0,40	0,39
tau=Fmax/(A*sqrt2)	[N/mm²]	0,08	0,08	0,07	<b>0,08</b>	0,45	0,46	0,49	
tau=F(15,7)/(A*sqrt2)	[N/mm²]	0,03		0,02	<b>0,027</b>	0,38	0,27	0,28	
Schubweg	[mm]	3,25	3,25	3,25	<b>2,38</b>	3,25	3,25	3,25	
Schubmodul max G	[N/mm²]	0,05	0,05	0,04	<b>0,0469</b>	0,26	0,27	0,29	
<b>Schubmodul min G</b>	<b>N/mm²</b>	<b>0,0228</b>		<b>0,0197</b>	<b>0,0212</b>	<b>0,22</b>	<b>0,16</b>	<b>0,17</b>	
Länge l	[mm]	2750,00	2750,00	2750,00	<b>2750</b>	2750,00	2750,00	2750,00	
Federsteifigkeit f	[N/mm/mm²]	0,03	0,03	0,02	<b>0,0247</b>	0,14	0,14	0,15	
Federsteifigkeit fmin	[N/mm/mm²]	0,01		0,01	<b>0,0082</b>	0,12	0,08	0,09	
Schubkraft 1/2*f*u/l	N	0,04	0,04	0,04	<b>0,0401</b>	0,23	0,23	0,25	
Elementgröße 25²cm²	m²	62500	62500	62500	<b>62500</b>	62500	62500	62500	
Elementgröße 5²cm²	m²	0,0025	0,0025	0,0025	<b>0,0025</b>	0,0025	0,0025	0,0025	
Federsteifigkeit f 25²	kN/m	1626,24	1577,08	1422,38	<b>1542</b>	8703,19	8845,03	9437,33	
Federsteifigkeit f 25²min	kN/m	547,61		473,46	<b>511</b>				
Federsteifigkeit f 5²	kN/m	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	
Scherfestigkeitsversuchs Nr.		V29	V30	V31		V32	V33	V34	
Scherfestigkeit	[N]	4869	4880	6076	<b>5275</b>	5475	4009	5450	4978
Hauptscherspannung	[N/mm²]	7,42	7,51	9,00	<b>8</b>	8,46	5,99	8,27	8

Spannung in der Folie Eckelt **Pöben**

Relaxationsversuchs Nr.		pr1	pr2	pr3	Mittelwerte Eckelt	Mittelwerte Trosifol + Eckelt
Belastungsgeschwindigkeit	[mm/min]	0,03	0,03	0,03		
Temperatur		57°C	57°C	57°C		
Fläche A	[mm <sup>2</sup> ]	650	629	654		
Fmax	[N]	89,80	83,80	94,60	89,40	82,08
F(15,7h) 5,64E4[s]	[N]	29	3,07E+01	3,20E+01	30,57	28,32
sigma=Fmax/A	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13
sigma=Fmin(15,7)/A	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,0446	0,0488	0,0489	0,0474	0,0435
tau=Fmax/(A*sqrt2)	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,10	0,09	0,10	0,10	0,0891
tau=F(15,7)/(A*sqrt2)	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,0307
Schubweg u	[mm]	3,249	3,249	3,249	3,25	3,25
Schubmodul max G	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,06	0,06	0,06	0,0573	0,05
<b>Schubmodul min G (15,7h)</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>0,0184</b>	<b>0,0202</b>	<b>0,0202</b>	<b>0,0196</b>	<b>0,0203</b>
Länge l	[mm]	2750	2750	2750	2750,00	2750,00
Federsteifigkeit f	[N/mm/mm <sup>2</sup> ]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Federsteifigkeit fmin	[N/mm/mm <sup>2</sup> ]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Schubkraft 1/2*t*u/l	N	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
Elementgrösse 25°cm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	62500	62500	62500	62500	62500,00
Elementgrösse 5°cm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	2500	2500	2500	2500	1250,00
Federsteifigkeit f 25°	kN/m	1879,25	1811,55	1966,58	1885,79	1713,85
<b>Federsteifigkeit f 25°min</b>	<b>kN/m</b>	<b>606,89</b>	<b>663,66</b>	<b>665,23</b>	<b>645,26</b>	<b>591,37</b>
Federsteifigkeit f 5°	kN/m	75,17	72,46	78,66	75,43	37,72
Scherfestigkeitsversuchs Nr.		ku1	ku2	ku3		
Scherfestigkeit	[N]	12500	13200	11500	12400	8837,39
Hauptscherspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]		0,00	0,00	0,00	4,79

# Relaxation von PVB- Folie bei verschiedenen Temperaturen im Verlauf der Zeit







## Anhang 2

<b>Standardversuche mit einer Foliendicke von 1,9 mm</b>					
	Länge Folie	Breite Folie	A Folie	Last	Spannung N/A
	mm	mm	mm <sup>2</sup>	N	N/mm <sup>2</sup>
Tk1	26,32	25,4	669	6880	10,29
Tk2	25,65	25,66	658	8500	12,91
Tk3	24,96	26,17	653	4380	6,71
T4	24,71	24,64	609	7950	13,06
T5	25,46	25,01	637	5200	8,17
T6	25,09	26,58	667	7050	10,57
V17	25,54	25,95	663	6517	9,83
V18	25,67	25,58	657	6925	10,55
V19	26,31	25,63	674	8477	12,57
V23	25,66	24,33	624	5371	8,60
V24	24,76	24,82	615	6765	11,01
V25	25,74	24,78	638	5518	8,65
V26	25,39	25,4	645	6146	9,53
V27	25,61	24,91	638	6875	10,78
V28	24,88	25,31	630	5611	8,91
V29	25,01	26,22	656	4869	7,42
V30	25,62	25,35	649	4880	7,51
V31	25,42	26,56	675	6076	9,00
V32	25,06	25,82	647	5475	8,46
V33	26,04	25,69	669	4009	5,99
V34	25,66	25,67	659	5450	8,27
pr1	25,42	24,92	633	12500	19,73
pr2	25,25	25,67	648	13200	20,37
pr3	25,49	26,3	670	11500	17,15
pr4	25,56	25,5	652	10500	16,11
pr5	24,86	26,31	654	14000	21,40
pr6	25,32	25,57	647	17200	26,57
Durchschnitt					<b>9,47</b>
Durchschnitt Eckelt					<b>9,47</b>
Durchschnitt Trosifol					<b>20,22</b>



## Anhang 3

### Untersuchung des E-Moduls der PVB-Folie im Dauerzugversuch

#### Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsaufbau für Dauerzugversuch an PVB .....	2
2	Versuchsprogramm .....	3
3	Ergebnisse .....	4
3.1	Zeit-Dehnungsverhalten .....	5
3.2	Versuchsergebnisse im Einzelnen .....	7

## 1 Versuchsaufbau für Dauerzugversuch an PVB

Zur Untersuchung des E-Moduls der PVB-Folie im Dauerzugversuch, wurden Probekörper der Folie 48 Stunden unter konstante Zugbelastung gesetzt. Die Probekörper hatten eine Breite von 130 mm und eine Länge von 400 mm. Die verwendete Folie hatte eine Dicke von 0,76 mm. Die Messungen fanden in einer Klimakammer mit konstanten Umweltbedingungen statt. Die Temperatur betrug 9,0° C und die relative Luftfeuchtigkeit 95 %.

Die Probekörper wurden an ihren Enden, 5 cm tief über die gesamte Breite eingespannt und mussten in verschiedenen Versuchsreihen unterschiedliche Zugkräfte aufnehmen. Zur späteren Auswertung wurden die Probekörper beschriftet und markiert.

Um die Vergleichbarkeit der Werte zu gewährleisten, wurde nur das Mittelstück ( $l = 200\text{mm}$ ) der Folie vermessen. Durch das Einschnüren der Folie unter Spannung und der daraus resultierenden konstanten Breite in diesem Bereich konnte man hier von einer reinen Zugbelastung ausgehen.

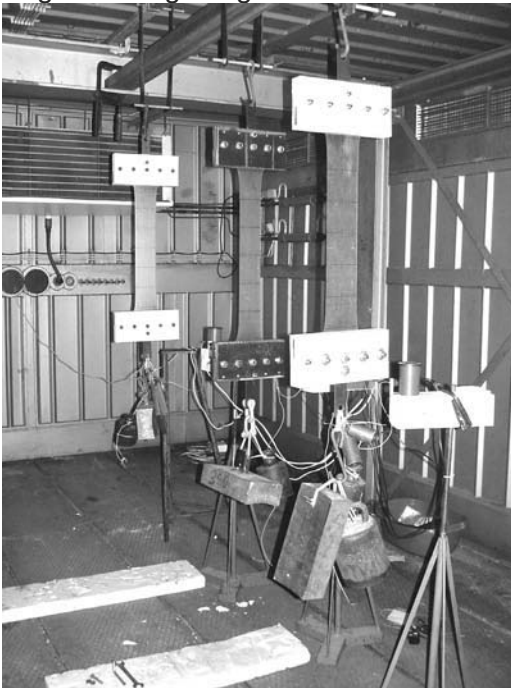


Abbildung 1: Versuchsaufbau Dauerzugversuch an PVB

Neben den Messungen aller Messpunkte auf der Folie nach 24 sowie nach 48 Stunden, wurden auch genauere Messreihen aufgestellt mit Messzeitpunkten bei  $t=5, 10, 15, 20, 35, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 480$  und  $600\text{min}$ .

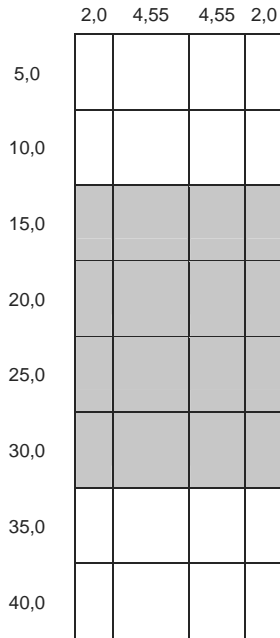


Abbildung 2: Messpunkte auf der Folie [cm], Mittelstück (grau)

## 2 Versuchsprogramm

Es wurden verschiedene Versuche durchgeführt und über die Zeit beobachtet, bei denen die Belastung variiert wurde,. Die Versuche mit ihren jeweiligen Belastungsfällen und deren Ergebnisse nach 48 Stunden sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:.

Tabelle 1: Übersicht über die Versuche und deren Ergebnis

Spannung	Versuche insgesamt	nicht gerissen	gerissen 0 - 24 h	gerissen 24 - 48 h
1,0 N/mm <sup>2</sup>	7	7	0	0
2,0 N/mm <sup>2</sup>	2	2	0	0
3,0 N/mm <sup>2</sup>	4	4	0	0
3,5 N/mm <sup>2</sup>	2	2	0	0
4,0 N/mm <sup>2</sup>	5	4	1	-
5,0 N/mm <sup>2</sup>	3	0	3	-
5,5 N/mm <sup>2</sup>	2	0	1	1
6,0 N/mm <sup>2</sup>	3	0	1	2
Summe	28	20	5	3

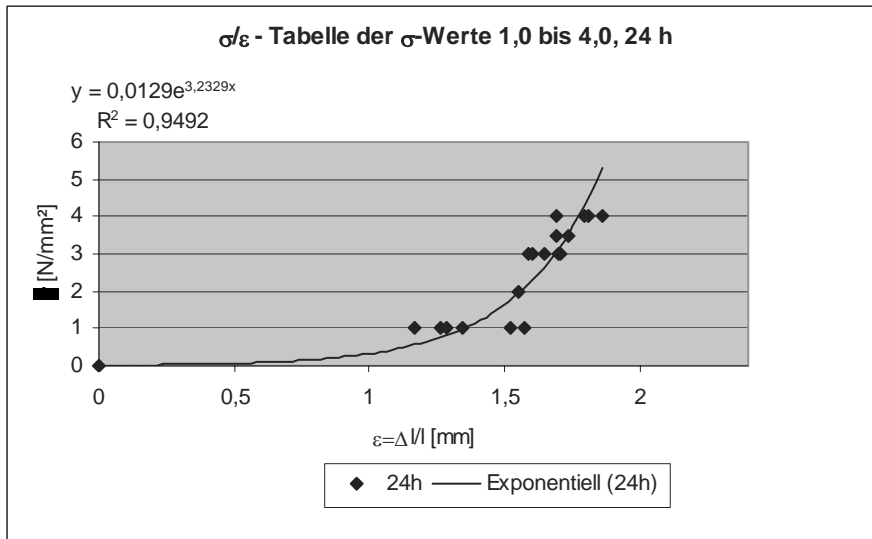
### 3 Ergebnisse

Bei den Versuchen mit gleicher Zugspannung wird ein Mittelwert aus den einzelnen Längenänderungen  $\Delta l$  gebildet. Zur Ermittlung der Dehnung  $\varepsilon$  werden die Durchschnittswerte ins Verhältnis zum Wert der Ausgangslänge gesetzt. Damit lässt sich ein  $\sigma$ - $\varepsilon$  Diagramm wie in Abb. 5 dargestellt zeichnen.

**Tabelle 2:  $\Delta l$ -Durchschnittswerte,  $\sigma/\varepsilon$**

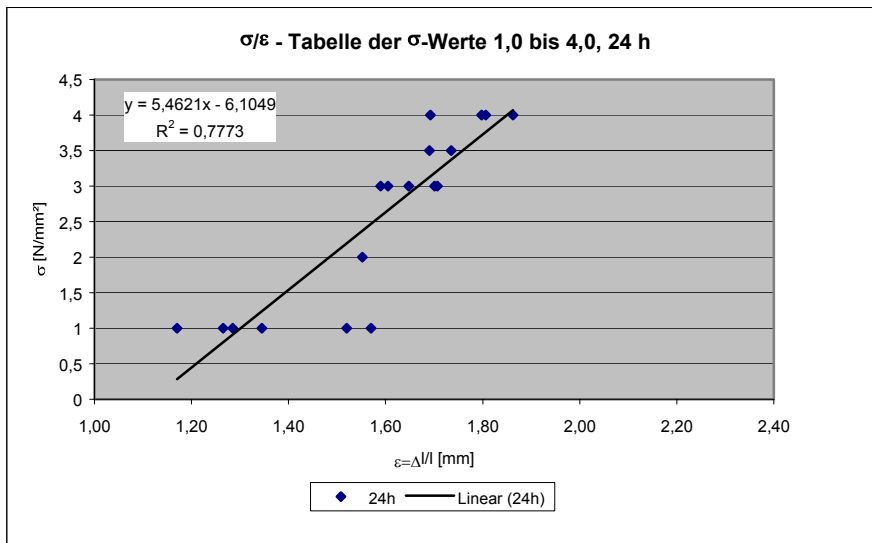
	Durchschnittswerte	$\varepsilon$ - Werte
nach 24h		( $l=200\text{mm}$ )
$\sigma [\text{N/mm}^2]$	$\Delta l [\text{mm}]$	$\varepsilon = \Delta l / l [\text{mm}]$
1,0	271,8	1,36
3,0	310,5	1,65
3,5	342,5	1,71
4,0	357,9	1,79
5,5	412,0	2,06
6,0	453,2	2,27

Da bei Versuchen mit einer Spannung über  $4 \text{ N/mm}^2$ , nach 24 Stunden nur drei von sieben Probekörper nicht gerissen waren, wird in der folgenden Tabelle nur der Messbereich zwischen  $1,0$  bis  $4,0 \text{ N/mm}^2$  berücksichtigt.



**Abbildung 3:  $\sigma$ - $\varepsilon$  -Diagramm mit exponentieller Trendlinie**

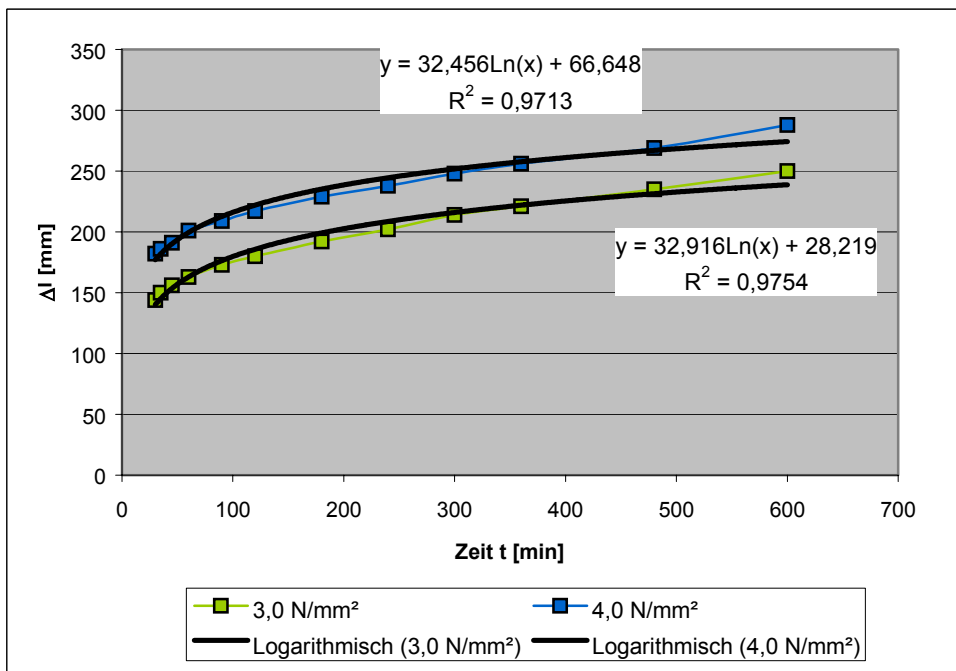
Trägt man alle Messwerte in eine Tabelle ein und errechnet aus den vorhandenen Messpunkten eine lineare Trendlinie im Bereich von  $1 \text{ N/mm}^2$  bis  $4 \text{ N/mm}^2$ , so lässt sich eine Gerade ermitteln, die nicht durch den Nullpunkt verläuft und somit auch keinen E-Modul darstellt.



**Abbildung 4:  $\sigma$ - $\varepsilon$  - Diagramm mit linearer Trendlinie**

### 3.1 Zeit-Dehnungsverhalten

Interessant bei der Resttragfähigkeitsuntersuchung ist das Dehnungsverhalten der Folie über die Zeit. Betrachtet man den in Abb. 4 dargestellten Verlauf der Dehnung über die Zeit, so erkennt man eine starke Anfangsdehnung und dann eine mit der Zeit abklingende Verformung. Diese abklingenden Dehnungen können als Kriechdehnungen aufgefasst und mit einer logarithmischen Funktion dargestellt werden.



**Abbildung 5: Weg-Zeit Diagramm für die PVB Folie unter einer Spannung von 3N/mm² und 4N/mm².**

### .1.1.1 Plastische Verformungen

Bei der Untersuchung der Folienstücke nach der Belastung konnte keine ausgeprägte plastische Verformung festgestellt werden.

**Tabelle 3: Probekörperlänge nach Entlastung (V1 = Versuchsnummer 1,...)**

Messwerte												
nach												
Entspannung	V1	V2	V3	V6	V7	V10	V23	V9	V12	V15	V24	V26
$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]												
1,0	204	205	218	213	209	213						
2,0							220					
3,0								213	214	211	214	215
3,5												
4,0												
5,0												
5,5												
6,0												
	V27	V28	V13	V16	V22	V25	V18	V5	V8			
$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]												
1,0												
2,0												
3,0												
3,5	x	x										
4,0			214	215	215	207						
5,0												
5,5							211					
6,0								x	x			

Alle Stücke dehnten sich bei gemessener Ausgangslänge von  $l=200\text{mm}$  im Mittel um  $13,5\text{mm}$  ( $\Delta l/l=\varepsilon=13,5/200=0,0675$ ).



### 3.2 Versuchsergebnisse im einzelnen

Längenänderung  $\Delta l$  [mm] bei einer Ausgangslänge von  $l=200\text{mm}$ .

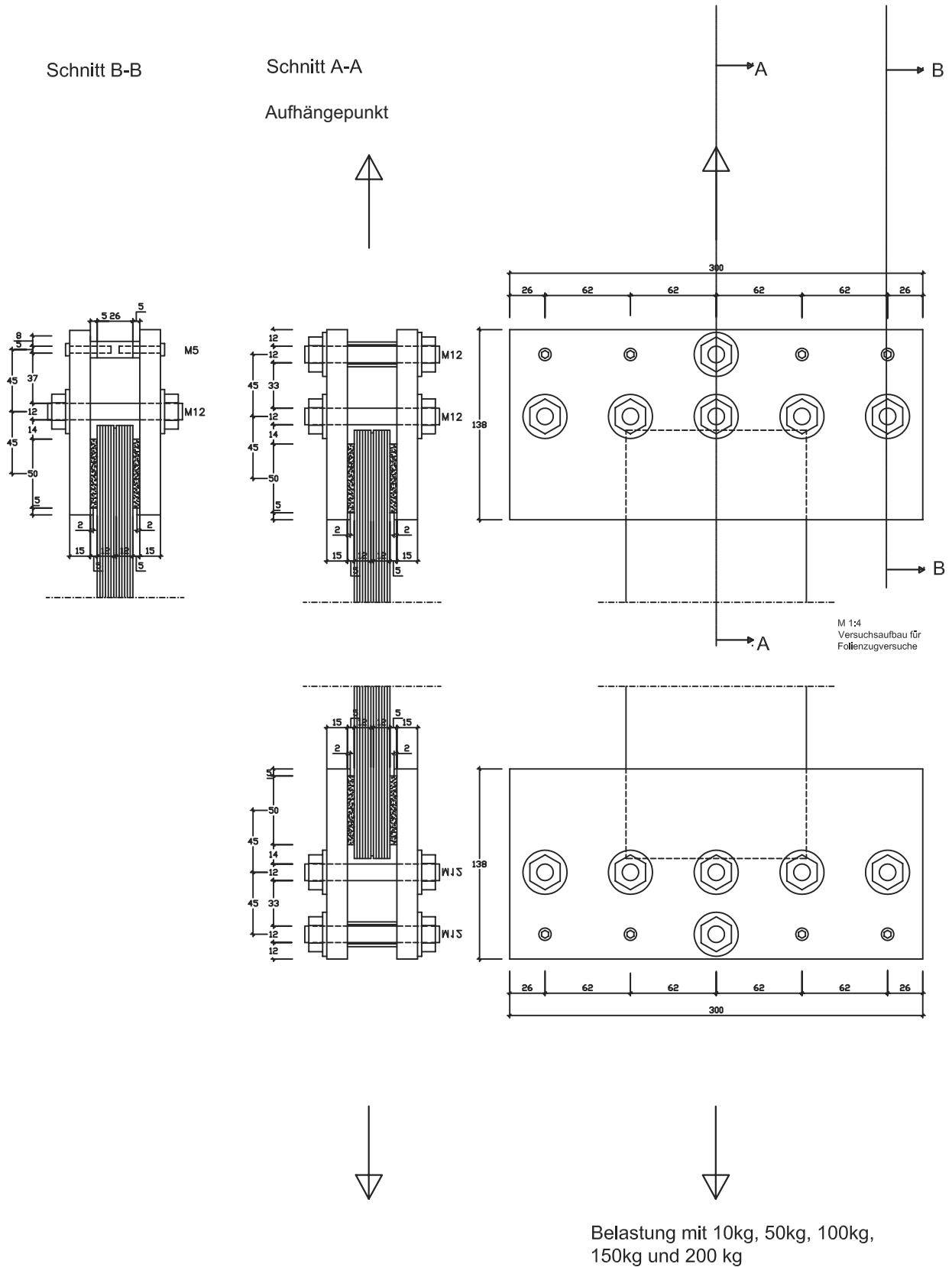
**Tabelle 4: Längenänderung nach 24h**

Messwerte												
nach 24h	V1	V2	V3	V6	V7	V10	V23	V9	V12	V15	V24	V26
$\sigma[\text{N/mm}^2]$												
1,0	253	257	314	234	269	304						
2,0							311					
3,0								341	340	321	330	318
3,5												
4,0												
5,0												
5,5												
6,0												
	V27	V28	V13	V16	V22	V25	V18	V5	V8			
$\sigma[\text{N/mm}^2]$												
1,0												
2,0												
3,0												
3,5	338	347										
4,0			361	338	372	360						
5,0												
5,5							478					
6,0								398	509			

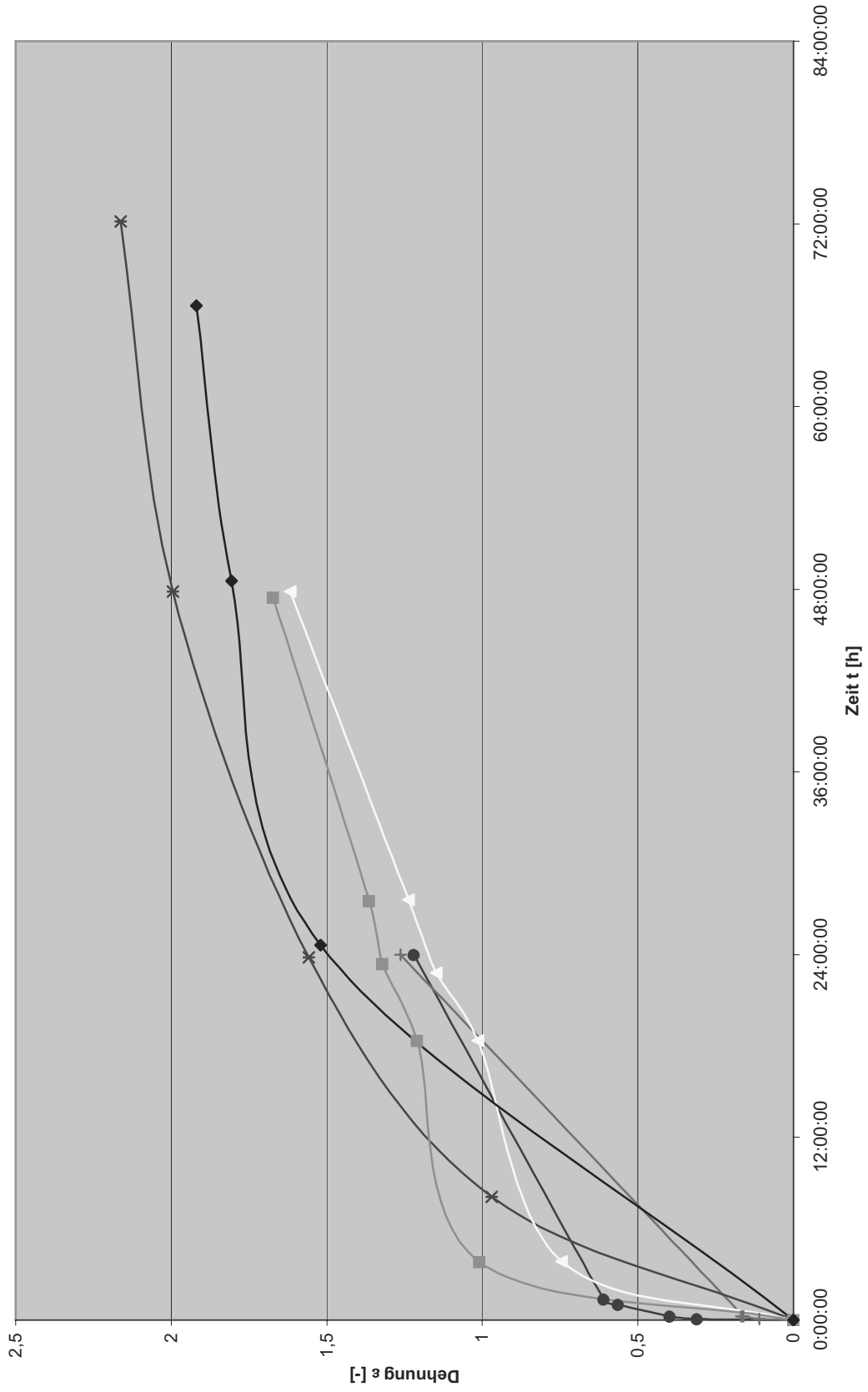
**Tabelle 5: Längenänderung nach 48h**

Messwerte												
nach 48h	V1	V2	V3	V6	V7	V10	V23	V9	V12	V15	V24	V26
$\sigma[\text{N/mm}^2]$												
1,0			405	334	345	364						
2,0							371					
3,0								385	-	369	389	378
3,5												
4,0												
5,0												
5,5												
6,0												
	V27	V28	V13	V16	V22	V25	V18	V5	V8			
$\sigma[\text{N/mm}^2]$												
1,0												
2,0												
3,0												
3,5	398	414										
4,0			401	406	438	-						
5,0												
5,5							-					
6,0								-	-			

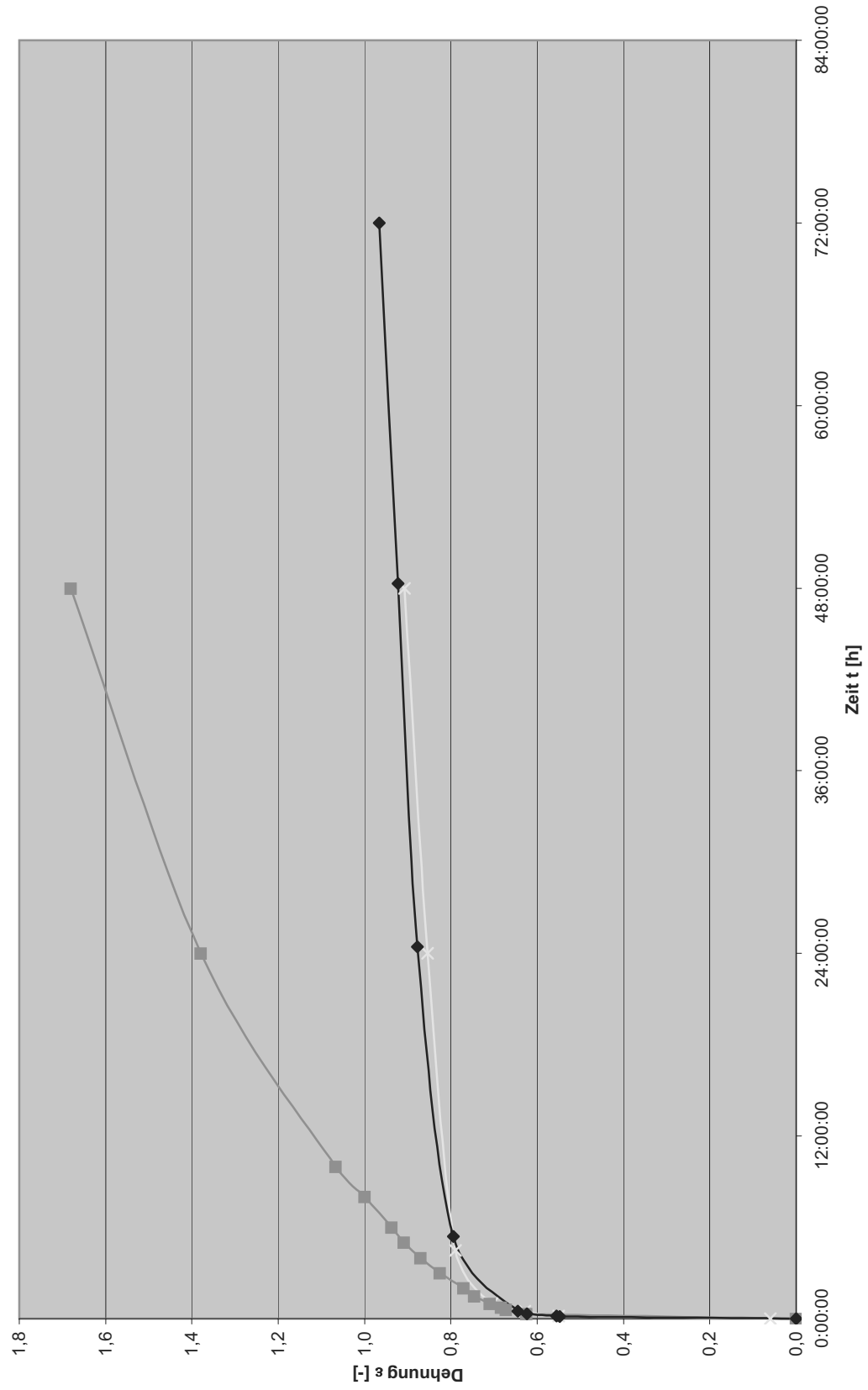
## Versuchsaufbau für Folienzugversuche



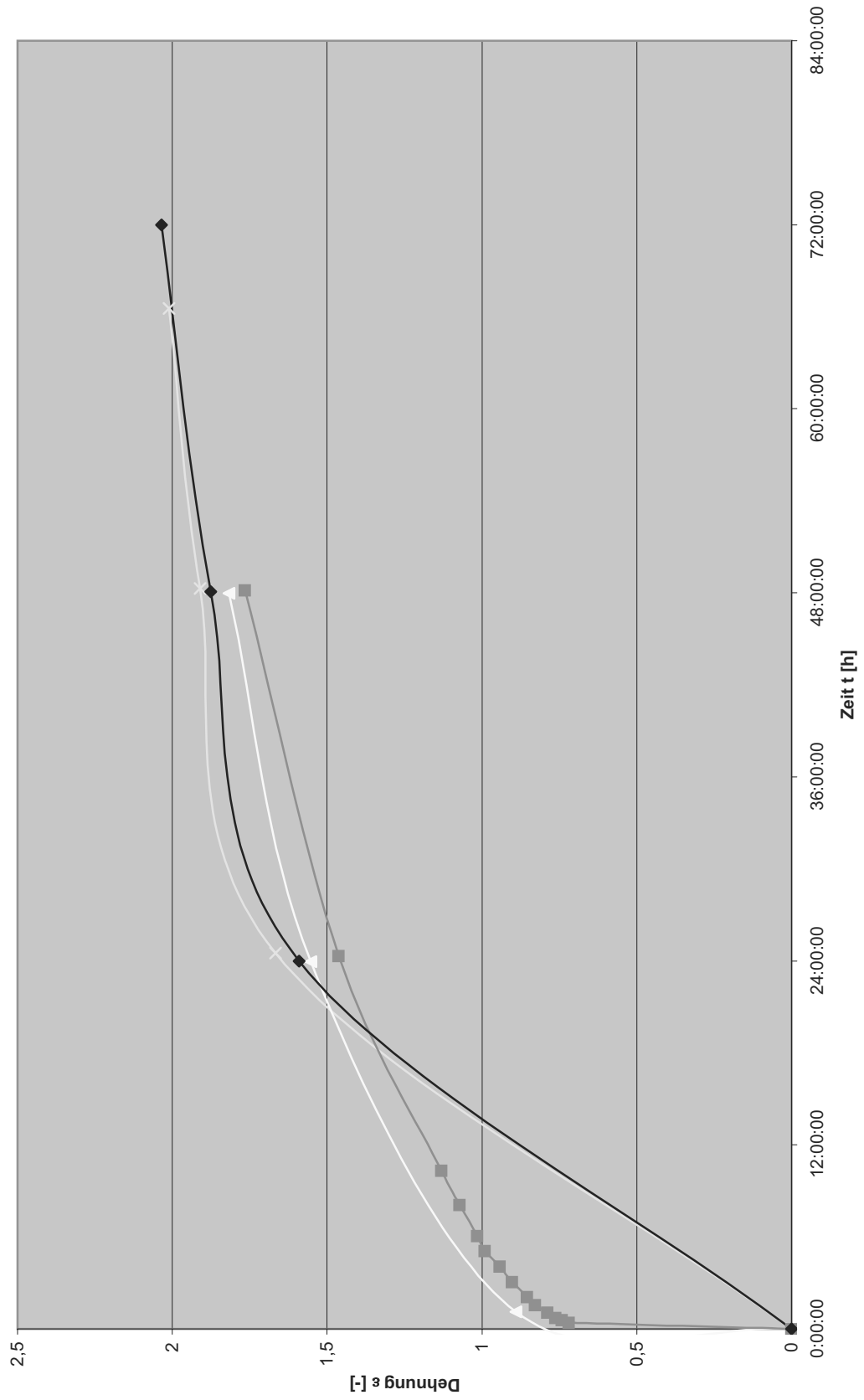
$\epsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 1,0 N/mm<sup>2</sup>



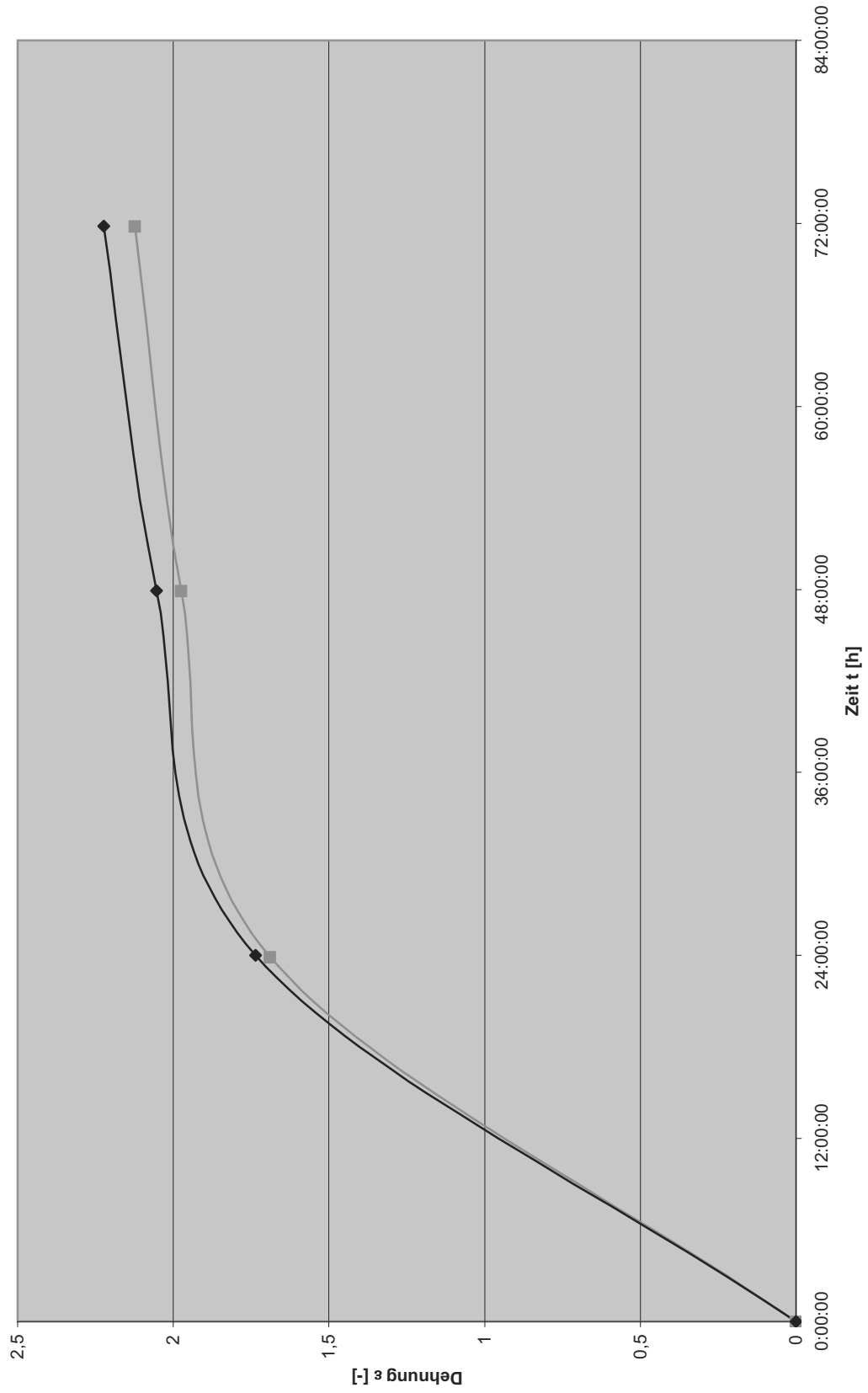
$\epsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 2,0 N/mm<sup>2</sup>



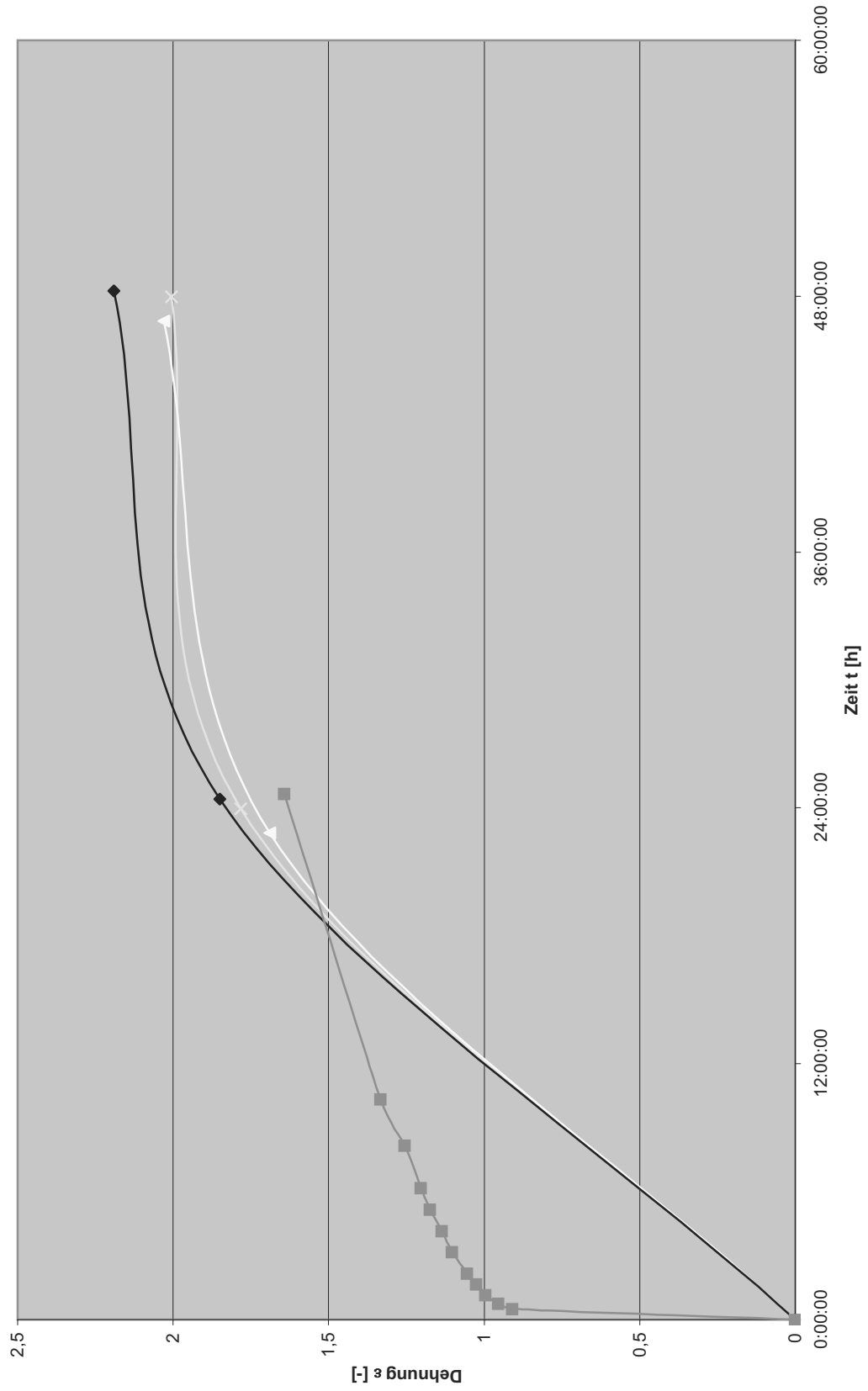
$\varepsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 3,0 N/mm<sup>2</sup>



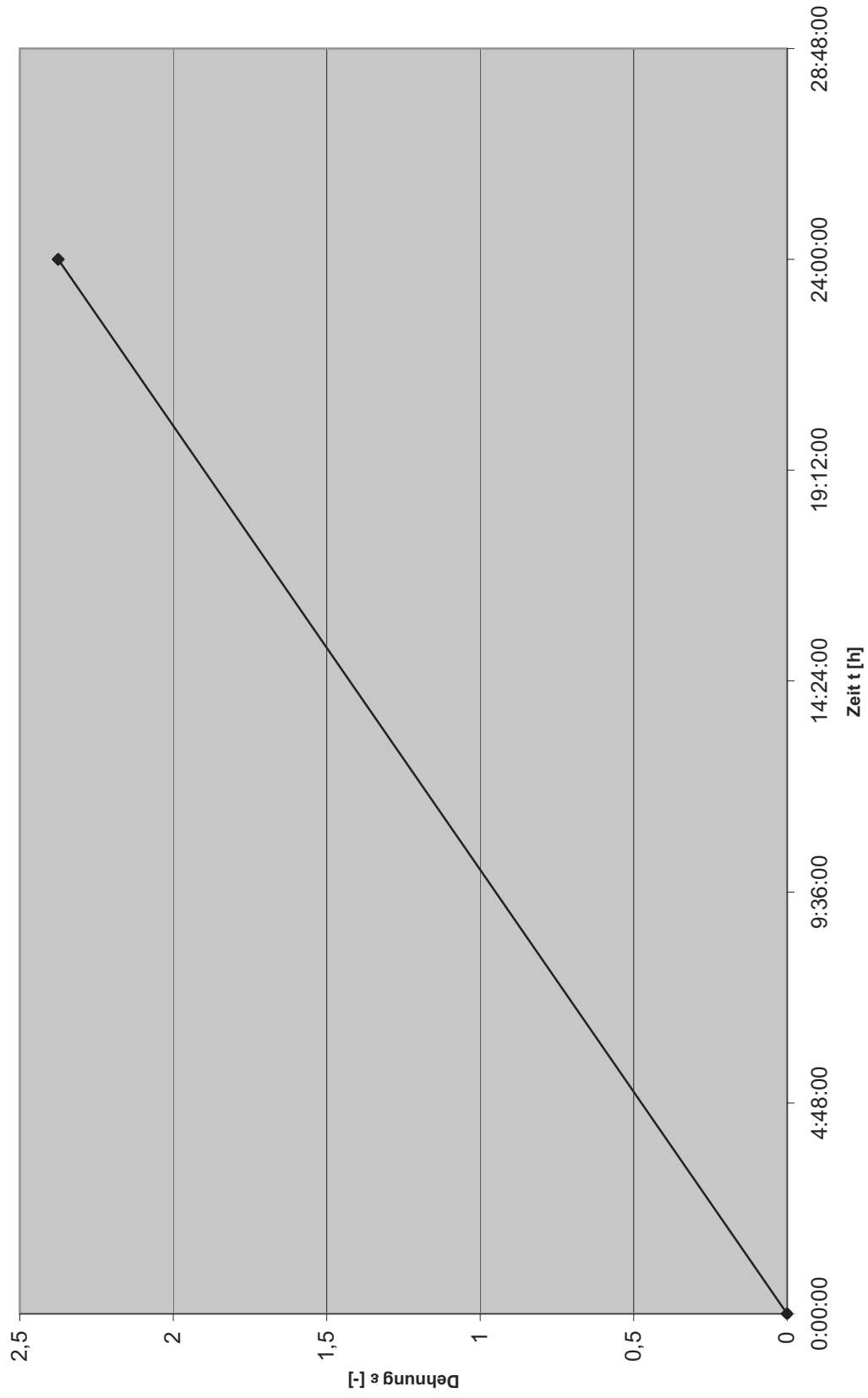
$\epsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 3,5 N/mm<sup>2</sup>



$\varepsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 4,0 N/mm<sup>2</sup>

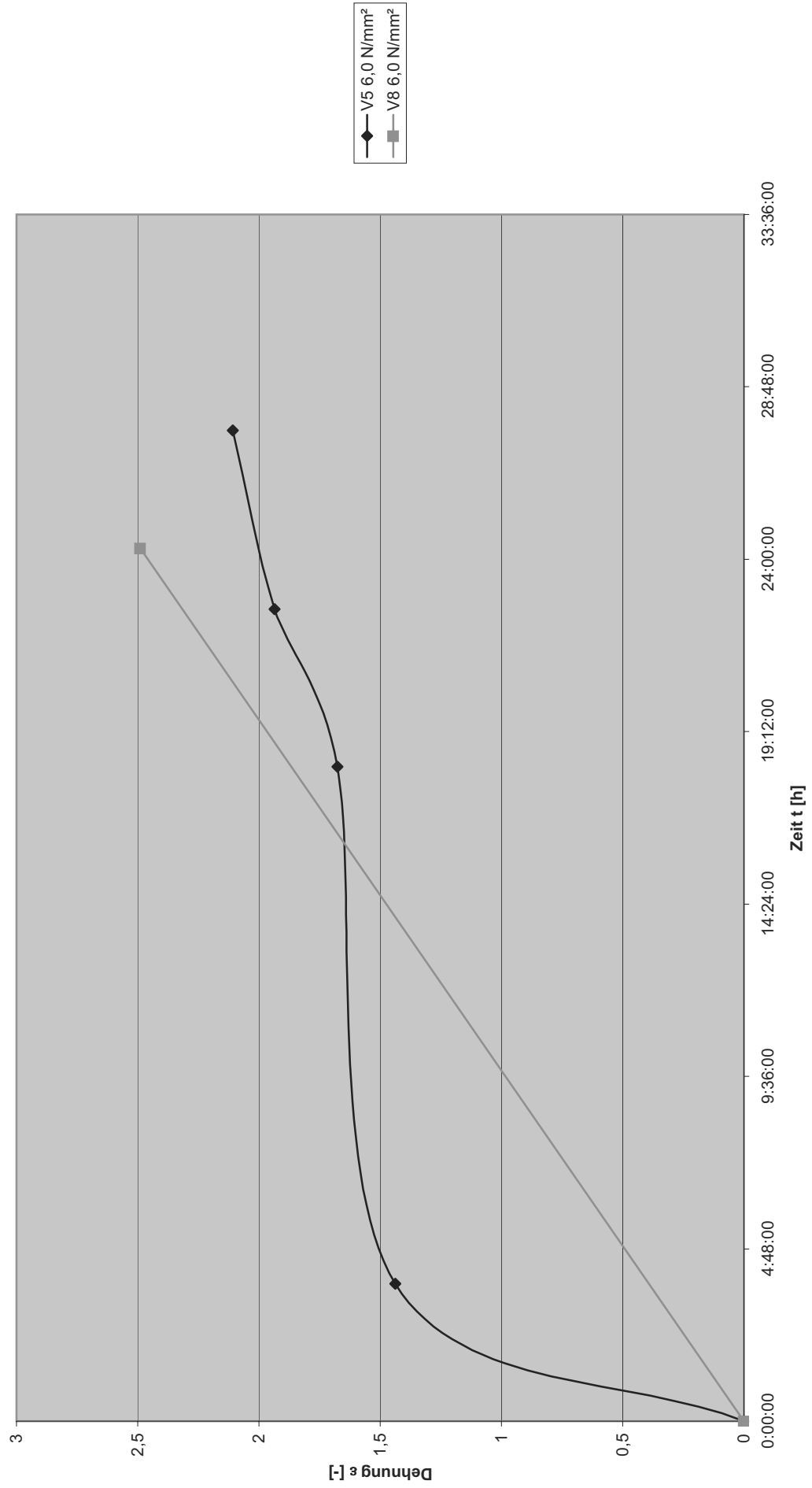


$\varepsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 5,5 N/mm<sup>2</sup>

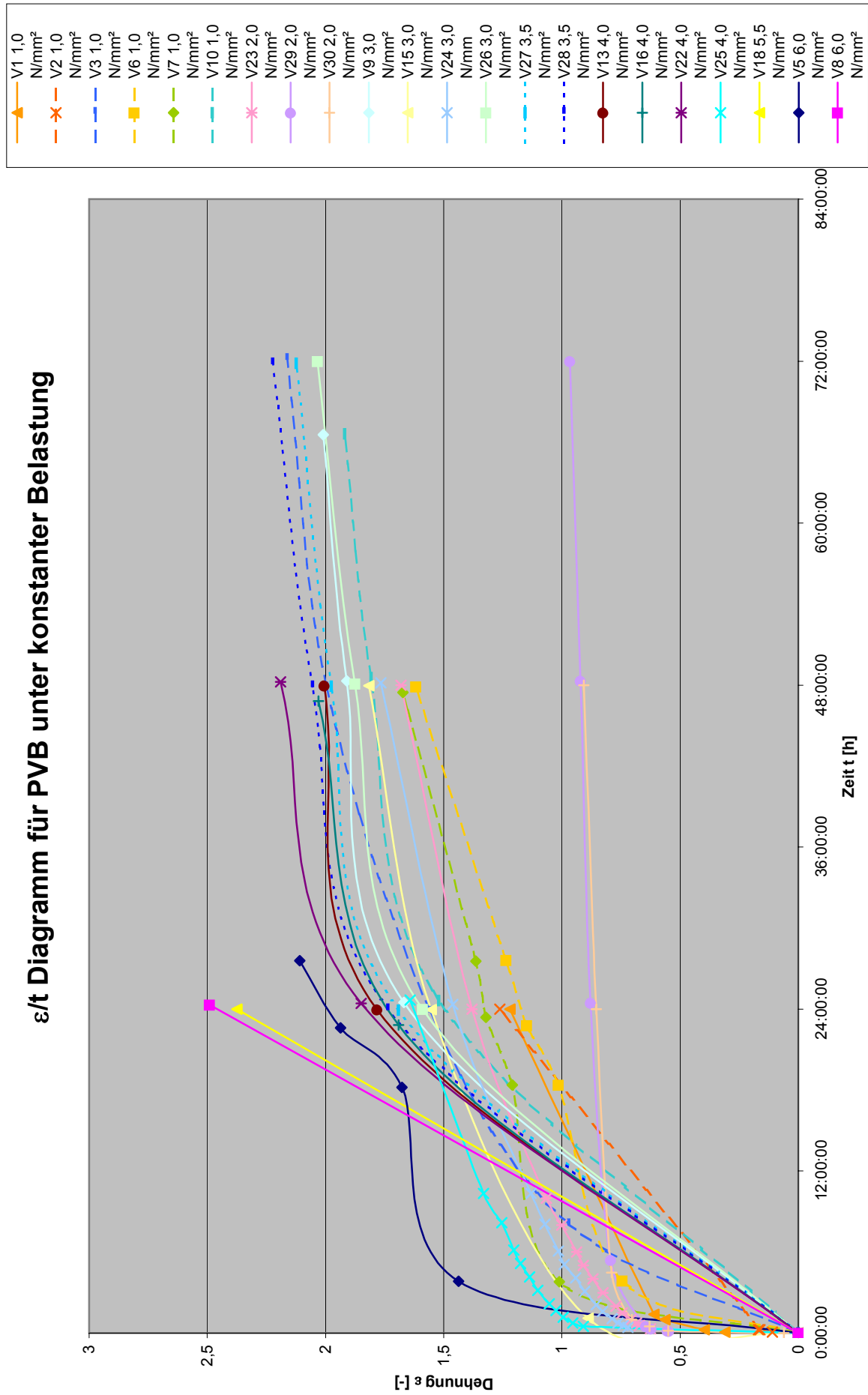




$\epsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 6,0 N/mm<sup>2</sup>



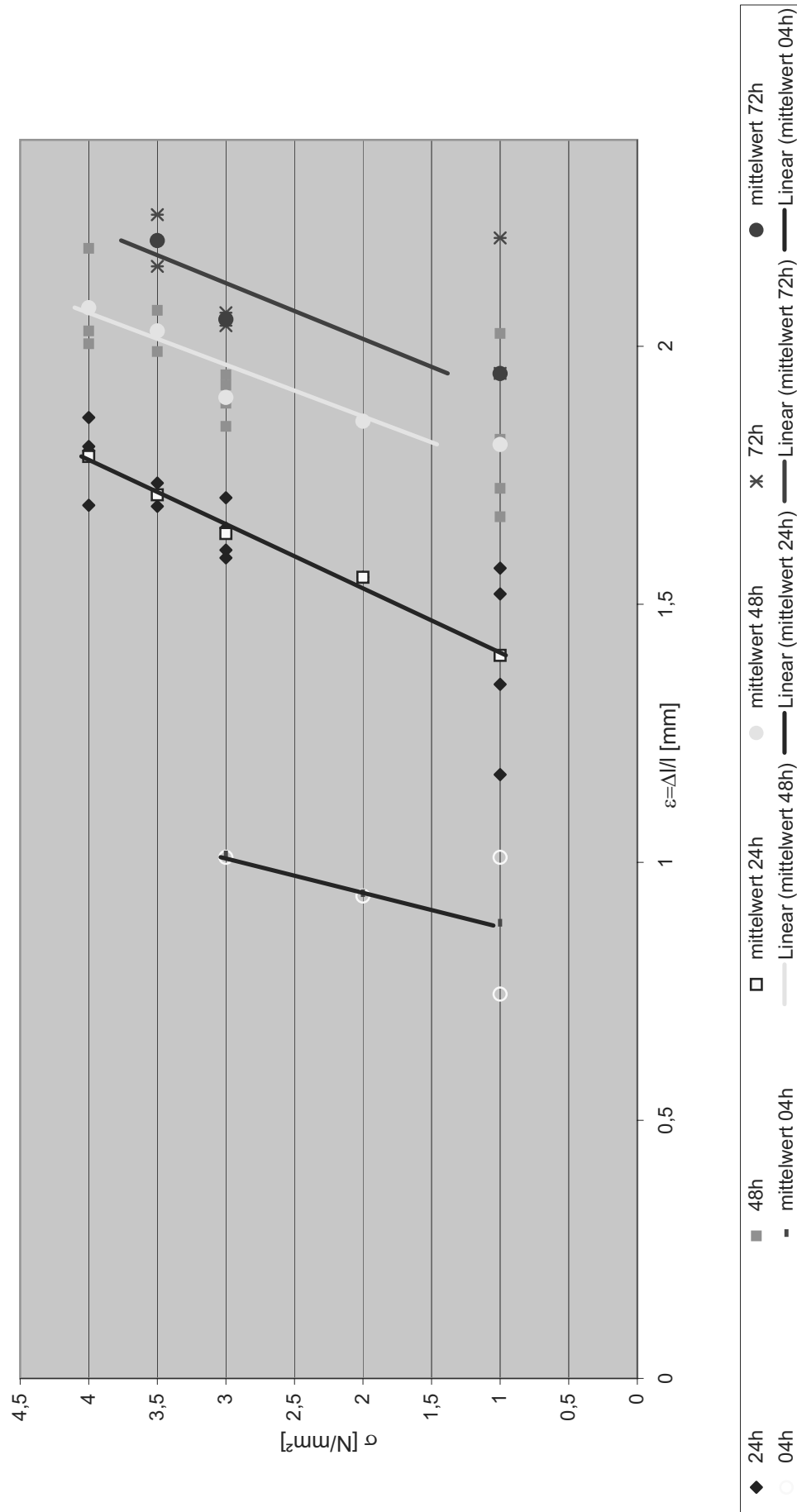
$\epsilon/t$  Diagramm für PVB unter konstanter Belastung



$\sigma/\varepsilon$  - Tabelle der  $\sigma$ -Werte 1,0 bis 4,0

$$y = 9,9713x - 16,587$$

$$R^2 = 0,8877$$





## Anhang 4

### Untersuchung des E-Moduls von gebrochenem VSG im Dauerzugversuch

#### Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsaufbau für Dauerzugversuche an VSG.....	2
2	Versuchsprogramm .....	3
3	Ergebnisse .....	3
3.1	Rissbild.....	3
3.2	Versuchsergebnisse in Tabellenform .....	4
3.2.1	Streuung .....	4
3.3	Graphen der Versuchsergebnisse.....	6
3.3.1	Darstellung der Versuchsergebnisse in einem $\sigma/\varepsilon$ Diagramm.....	6
3.3.2	Vergleich der Dehnung von PVB und gebrochenem VSG .....	7

## 1 Versuchsaufbau für Dauerzugversuche an VSG

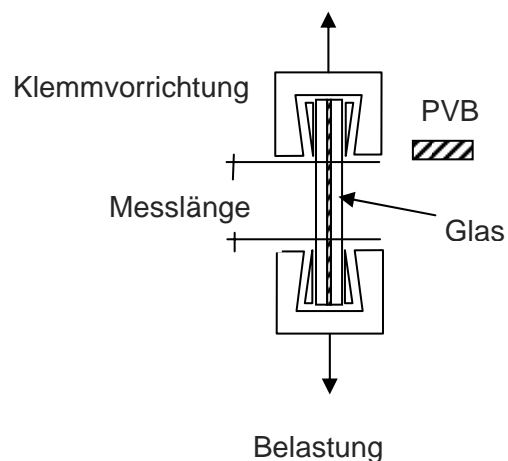
Zur Untersuchung der Resttragfähigkeit von gebrochenem Verbundsicherheitsglas (VSG) aus Einscheibensicherheitsglas (ESG) wurden Probekörper mit einem Hammer angeschlagen und im Dauerzugversuch bis zu 48 Stunden unter eine konstante Zugbelastung gesetzt. Die Messungen fanden in einer Klimakammer bei 10 °C statt.

Die aus zwei 10 mm ESG-Scheiben und einer 1,52 mm starken PVB-Folie bestehenden VS-Gläser hatten eine Breite von 300 mm, eine Länge von 400 mm und eine Dicke von 21,6 mm.

Es kam dieselbe Klemmvorrichtung zum Einsatz, welche schon für die Zugversuche mit PVB-Folien verwendet wurde. Auch hier wurden die Probekörper an ihren Enden über die gesamte Breite 5 cm tief eingespannt.

Die freie Messlänge des angeschlagenen Glases betrug somit 300 mm. Zur Auswertung wurden die Probekörper mit einer Rasterung versehen.

Um ein gleichmäßiges Bruchbild in der Messfläche zu erhalten, wurde der Anschlagpunkt an der oberen Kante, innerhalb der Klemmvorrichtung, gewählt.



**Abbildung 1:** Versuchsaufbau Dauerzugversuch an VSG und Versuchsschema

## 2 Versuchsprogramm

Es wurden insgesamt 18 Versuche mit unterschiedlicher Beanspruchung durchgeführt. Aus den Folienzugversuchen war bekannt, dass die Folie keine Spannung von über 4 N/mm<sup>2</sup> dauerhaft aufnehmen kann.

**Tabelle 1: Übersicht über die Versuchsreihen**

Spannung	Versuche insgesamt	gehalten	Abriss zw. 0-24 h	Abriss zw. 24-48 h
0,7 N/mm <sup>2</sup>	4	4		
1,0 N/mm <sup>2</sup>	3	3		
2,0 N/mm <sup>2</sup>	3	3		
2,5 N/mm <sup>2</sup>	3	0		3
3,0 N/mm <sup>2</sup>	2	0	2	
3,2 N/mm <sup>2</sup>	3	0	3	

In Tabelle 1 sind die Versuche mit ihren jeweiligen Beanspruchungsfällen und deren Ergebnis nach 48 Stunden bzw., im Versagensfall, dem Zeitpunkt des vorzeitigen Abrisses aufgeführt. Die Angabe der Spannung ist stets auf die vorhandene Folienfläche bezogen.

Während der Versuchsreihen wurde der Abstand zwischen den beiden Klemmen und den Rasterpunkten gemessen.

Bei größerer Beanspruchung und der damit verbundenen sofortigen Dehnung und bei der Vermutung eines vorzeitigen Abrisses, wurden auch genauere Messreihen aufgestellt.

Hierbei wurden die Messwerte in zu den Zeitpunkten  $t=1/2, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 120\text{min}$ , bis 48 h ermittelt.

Die Temperatur variierte zwischen 9,0° C und 10,0° C. Die relative Luftfeuchtigkeit betrug zwischen 50 % und 80 %.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Rissbild

Während die Probekörper auseinander gezogen wurden, entstanden über die gesamte Scheibe verteilt kleine Rissstellen innerhalb, sowie keilförmige Risse an den Rändern des Glases. Dabei gab es aber keine ausgewiesene Versagensstelle an der Einspannung oder in der Mitte der Scheiben. Zudem verlief die Abrisskante weitgehend horizontal.



Abbildung 2: Rissstellen einer VSG-Scheibe

### 3.2 Versuchsergebnisse in Tabellenform

#### 3.2.1 Streuung

Da jeweils nur drei Versuche mit gleicher Zugspannung durchgeführt wurden, konnte für die Längenänderung der Glaskörper nur ein Mittelwert und die jeweilige Streuung ermittelt werden. In der unteren Tabelle sieht man die durchschnittliche Dehnung nach 24 und 48 Stunden, bzw. die durchschnittliche Versuchsdauer bei gerissenen Probekörpern.

**Tabelle 2: Durchschnittliche Dehnung und Versuchsdauer**

Spannung	Versuche insgesamt	mittlere Dehnung in % nach		Abriss zw. 0-24 h	Abriss zw. 24-48 h
		24h	48h		
0,7 N/mm <sup>2</sup>	4	1%	2%		
1,0 N/mm <sup>2</sup>	3	4%	12%		
2,0 N/mm <sup>2</sup>	3	38%	59%		
2,5 N/mm <sup>2</sup>	3	66%			32,73 h
3,0 N/mm <sup>2</sup>	2			11,95 h	
3,2 N/mm <sup>2</sup>	3			14,48 h	

Vergleicht man bei den in den Versuchsreihen ermittelten Dehnungen nach 24 h und 48 h die Mittelwerte mit den Einzelergebnissen, so fallen einzelne Ausreißer auf. Bei einer Spannung um 1,0 N/mm<sup>2</sup> sind diese am häufigsten. Der Grund dafür ist, dass das Korngefüge bei dieser Grenzbelastung nur manchmal aufreißt und dadurch die Ergebnisse sehr stark streuen.

Bis zu einer Spannung von 0,7 N/mm<sup>2</sup> gibt es hingegen fast keine Dehnung, der Folie-Glas Verbund trägt noch als Ganzes und die Verzahnung zwischen den einzelnen Glaskörnern ist noch intakt. Das bedeutet, dass bei der Berechnung von gebrochenem VSG die Dehnungen, bei einer Beanspruchung von weniger als 0,7 N/mm<sup>2</sup> vernachlässigt werden können.



# Anhang 4

Tabelle 3: Längenänderung  $\Delta l$  [mm] bei einer Ausgangslänge von  $l=300\text{mm}$

	Dehnung														
nach 24h	in %	V4n	V6n	V7n	V8n	V9n	V1	V9	V5n	V2	V4	V6	V1n	V2n	V3n
$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]															
0,7		0%	1%	4%	1%	1%									
1,0							10%	1%	2%						
2,0										35%	38%	42%			
2,5													60%	64%	74%
3,0															
3,2															

	Dehnung														
nach 48h	in %	V4n	V6n	V7n	V8n	V9n	V1	V9	V5n	V2	V4	V6	V1n	V2n	V3n
σ [N/mm²]															
0,7		0%	3%	17%	3%	1%									
1,0							17%	8%	12%						
2,0										59%	56%	63%			000,0
2,5															
3,0															
3,2															

### 3.3 Graphen der Versuchsergebnisse

#### 3.3.1 Darstellung der Versuchsergebnisse in einem $\sigma/\varepsilon$ Diagramm

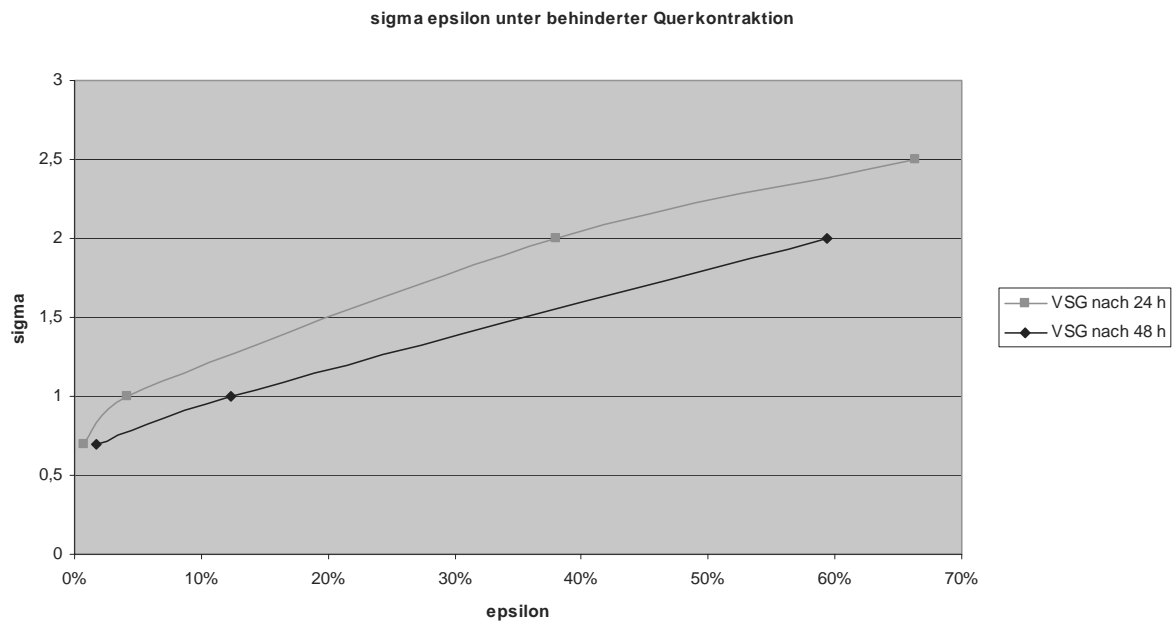


Abbildung 3: Darstellung der Versuchsergebnisse in einem  $\sigma/\varepsilon$  Diagramm

### 3.3.2 Vergleich der Dehnung von PVB und gebrochenem VSG

Vergleicht man das Dehnungsverhalten von PVB-Folie und VS-Glas, so lässt sich beobachten, dass sich die Folie bereits bei geringster Belastung bis hin zur Versteifung ausdehnt. Beim VSG hingegen ist bei niedriger Spannung keine Dehnung feststellbar. Erst ab 1,0 N/mm<sup>2</sup> dehnt sich das Glas bis hin zum Abriss.

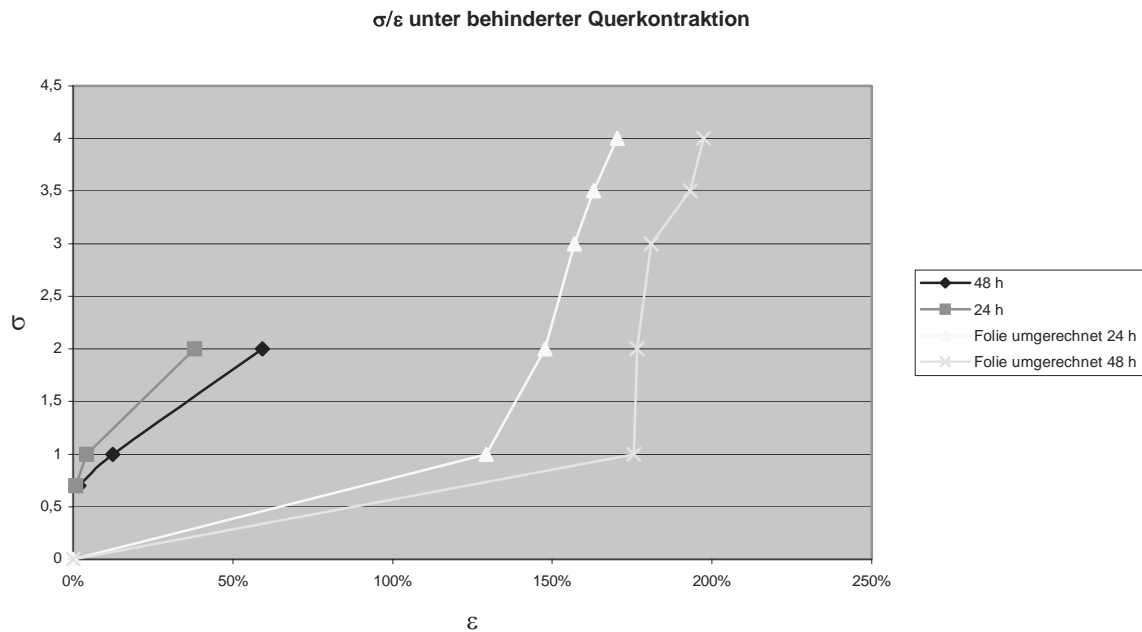
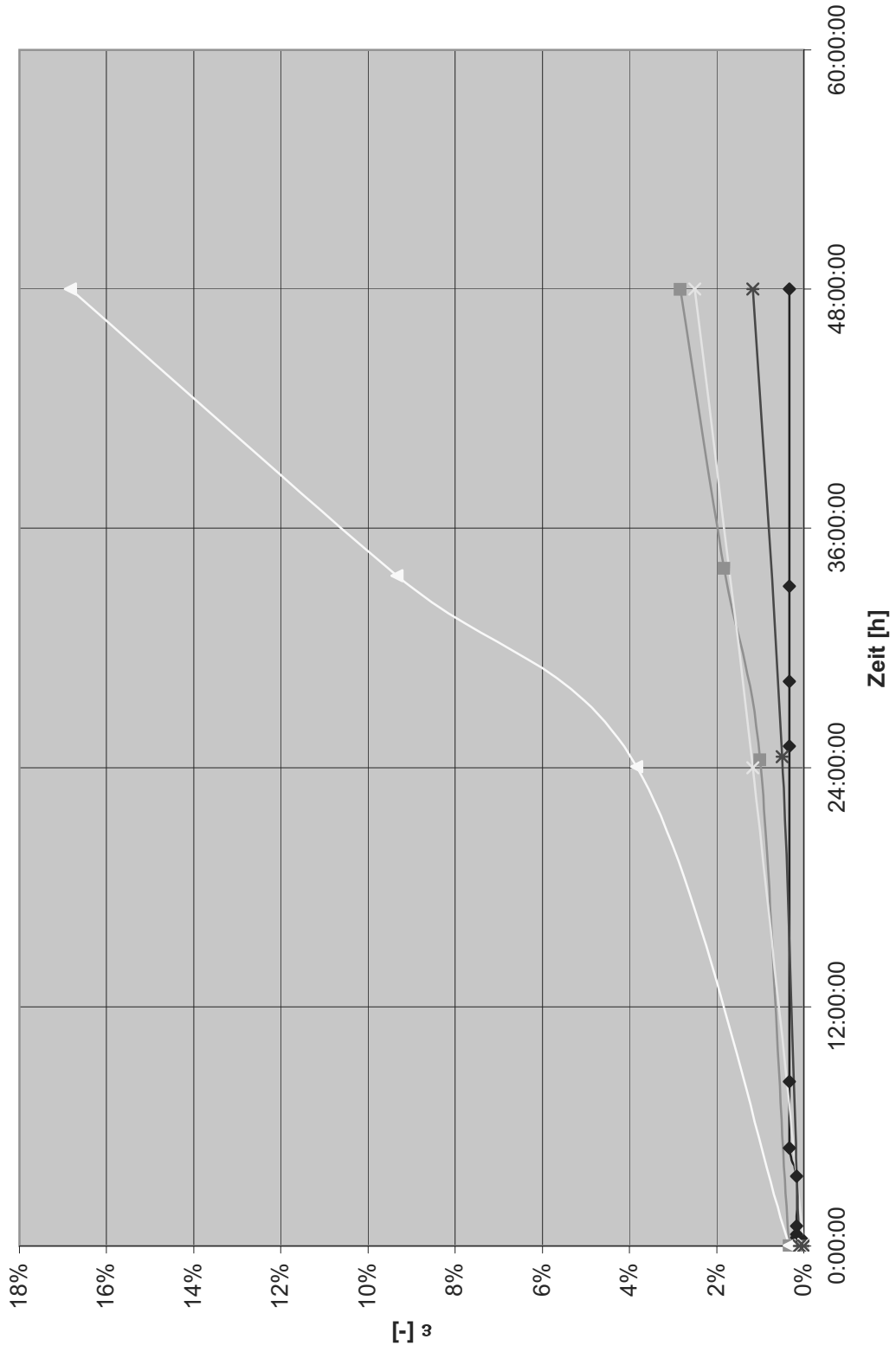
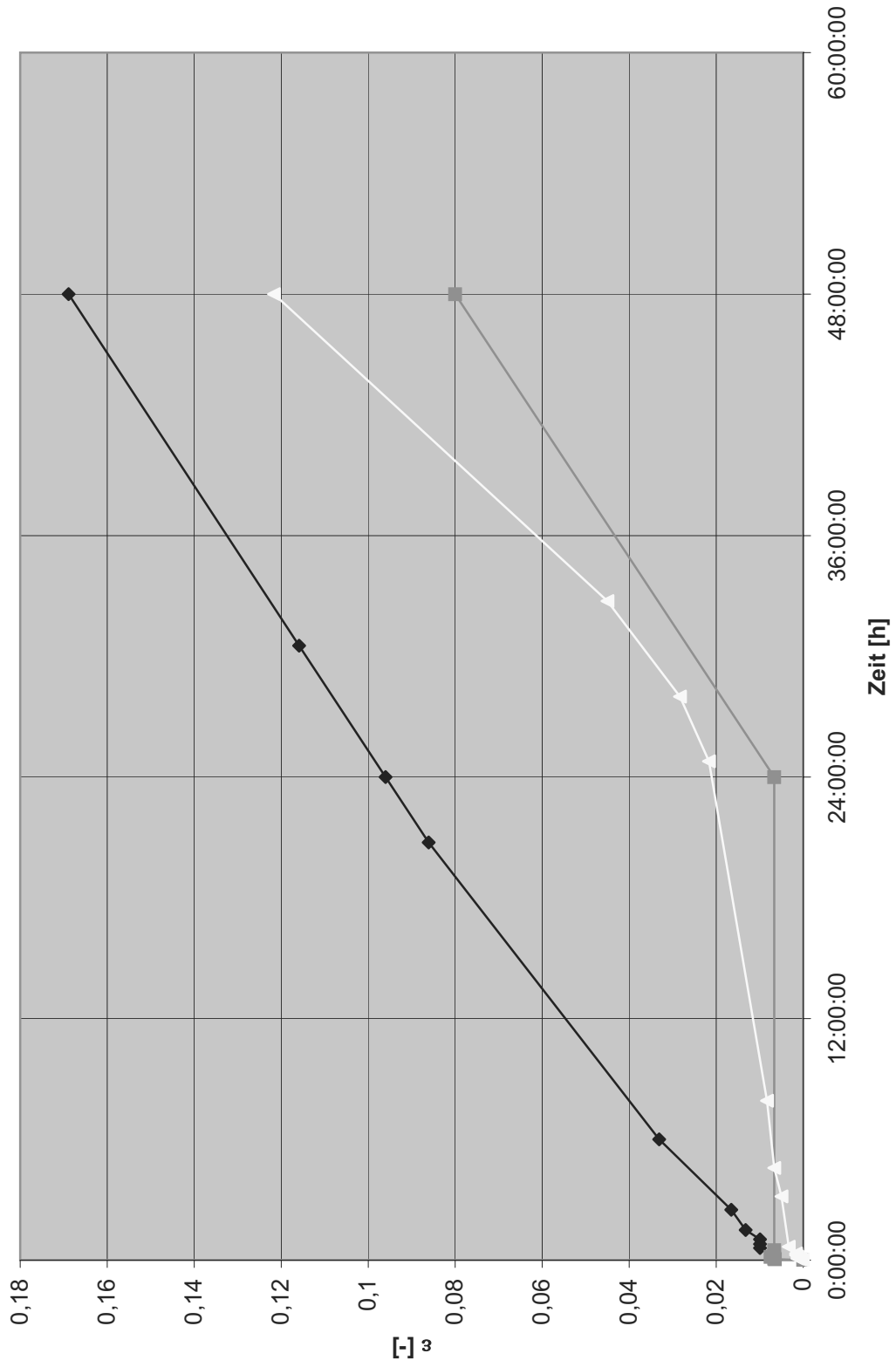


Abbildung 4: Vergleich der Dehnungen von reiner PVB Folie und gebrochenem VSG

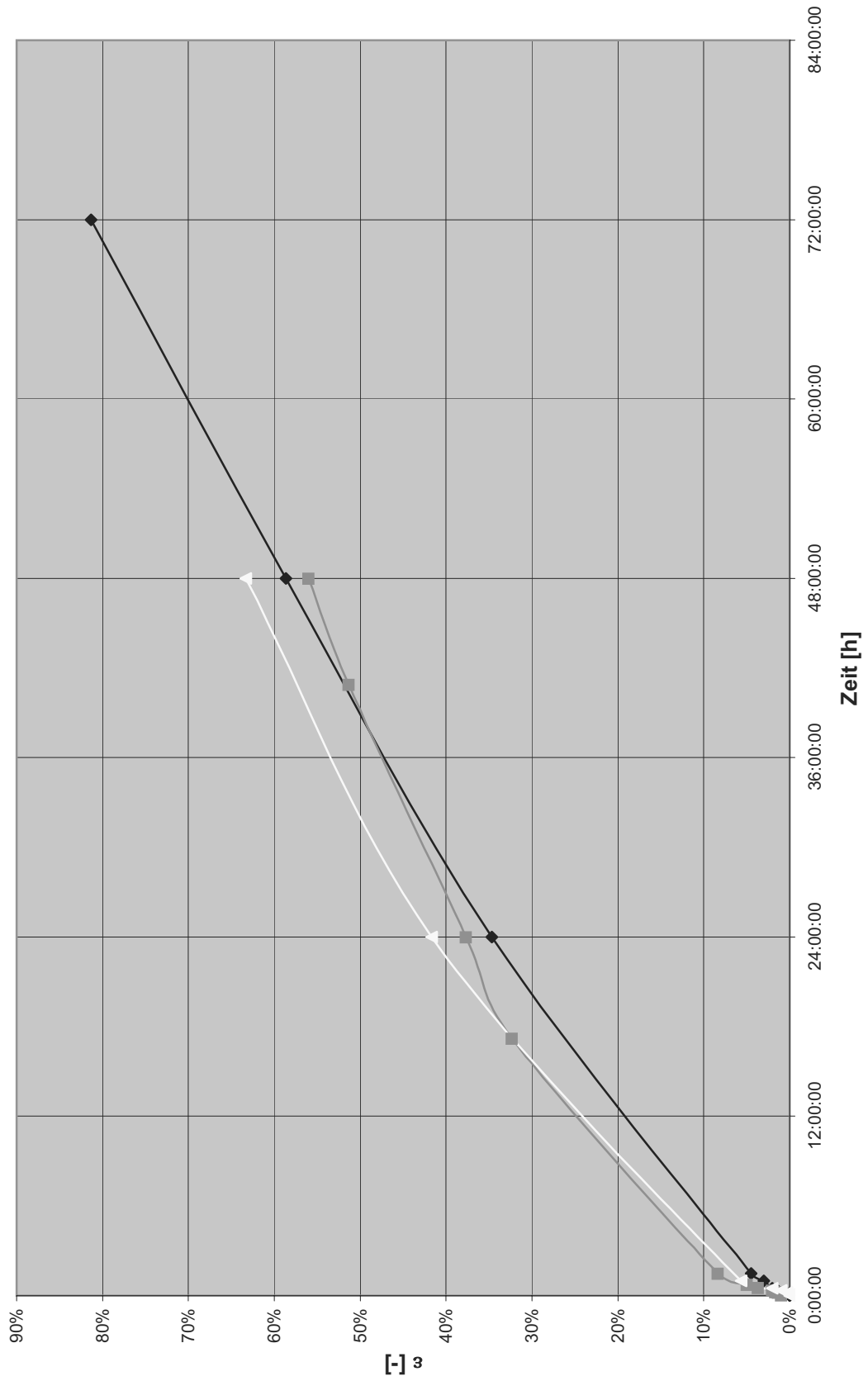
$\epsilon/t$  Diagramm für eine Spannung von 0,7 N/mm<sup>2</sup> für gebrochenes VSG



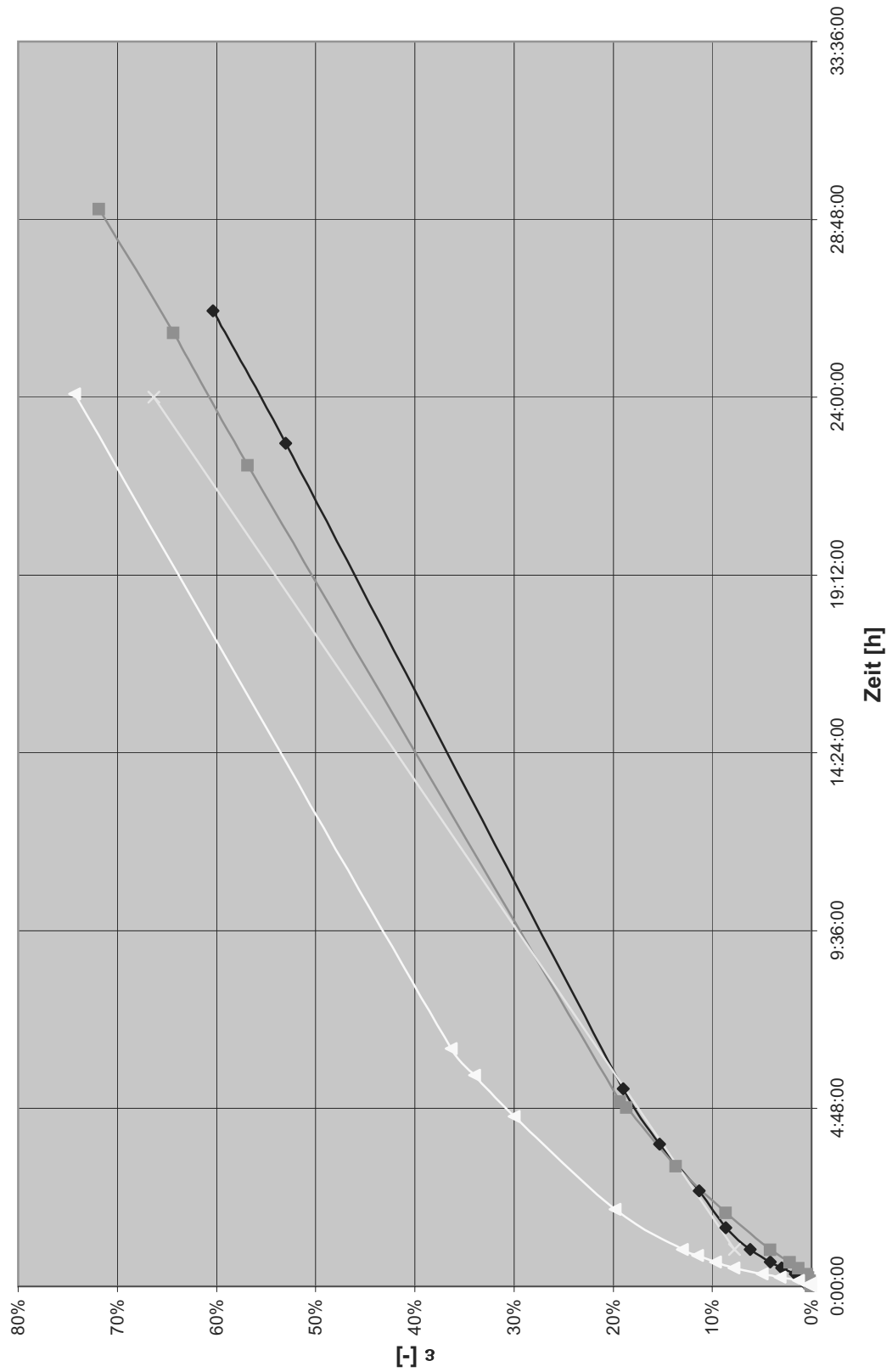
$\varepsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 1,0 N/mm<sup>2</sup> für gebrochenes VSG



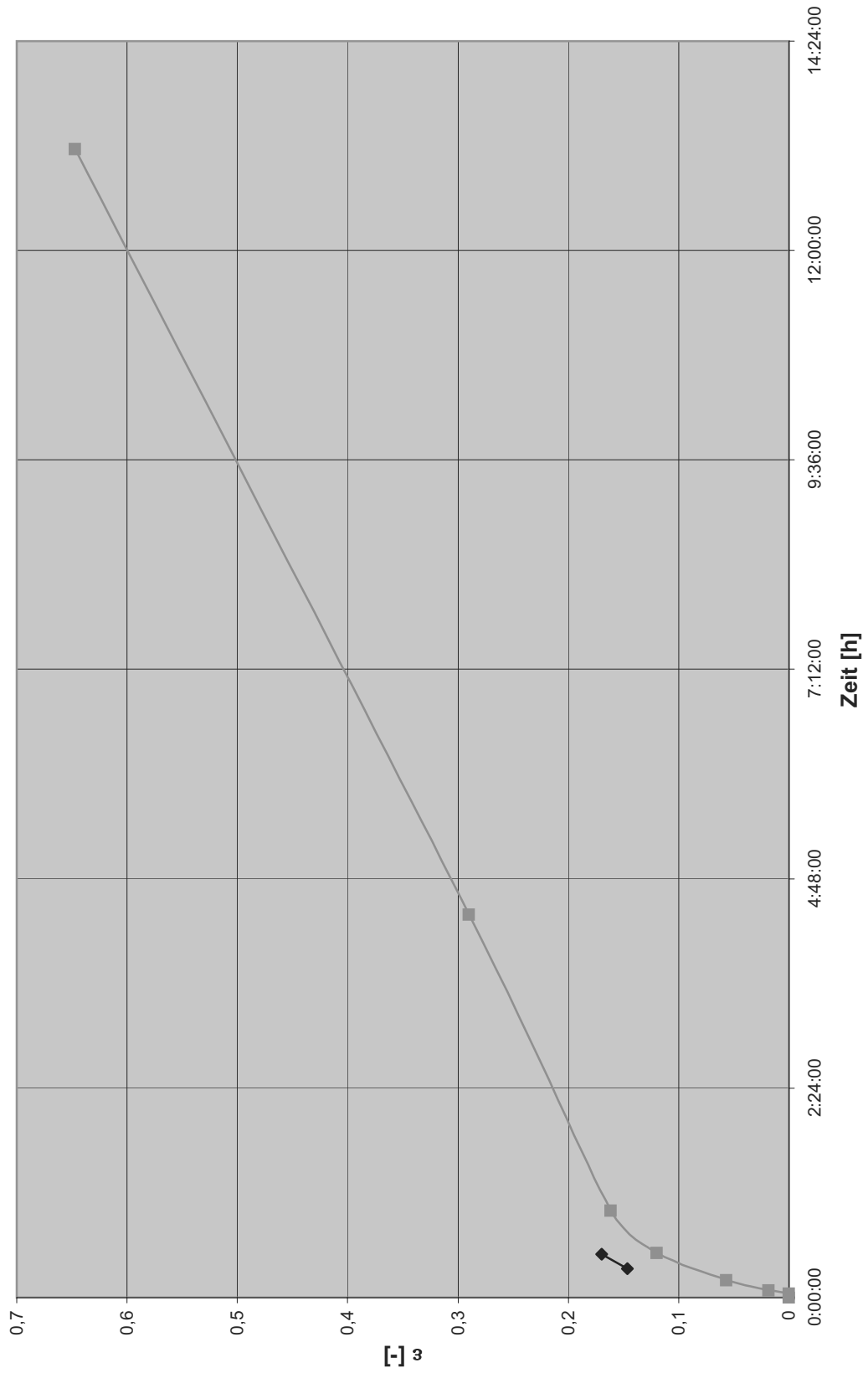
$\epsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 2,0 N/mm<sup>2</sup> für gebrochenes VSG



$\epsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 2,5 N/mm<sup>2</sup> für gebrochenes VSG

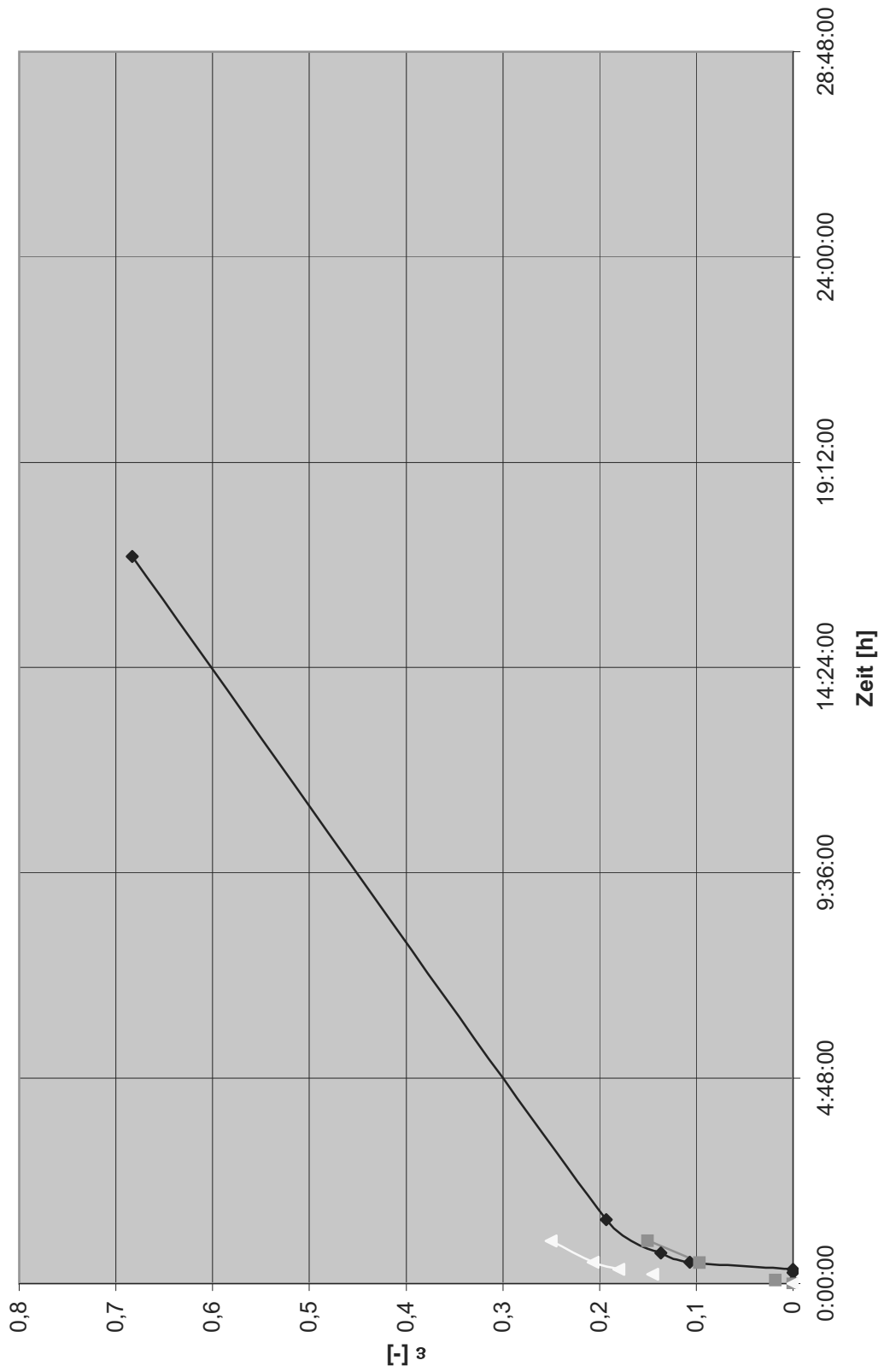


$\varepsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 3,0 N/mm<sup>2</sup> für gebrochenes VSG

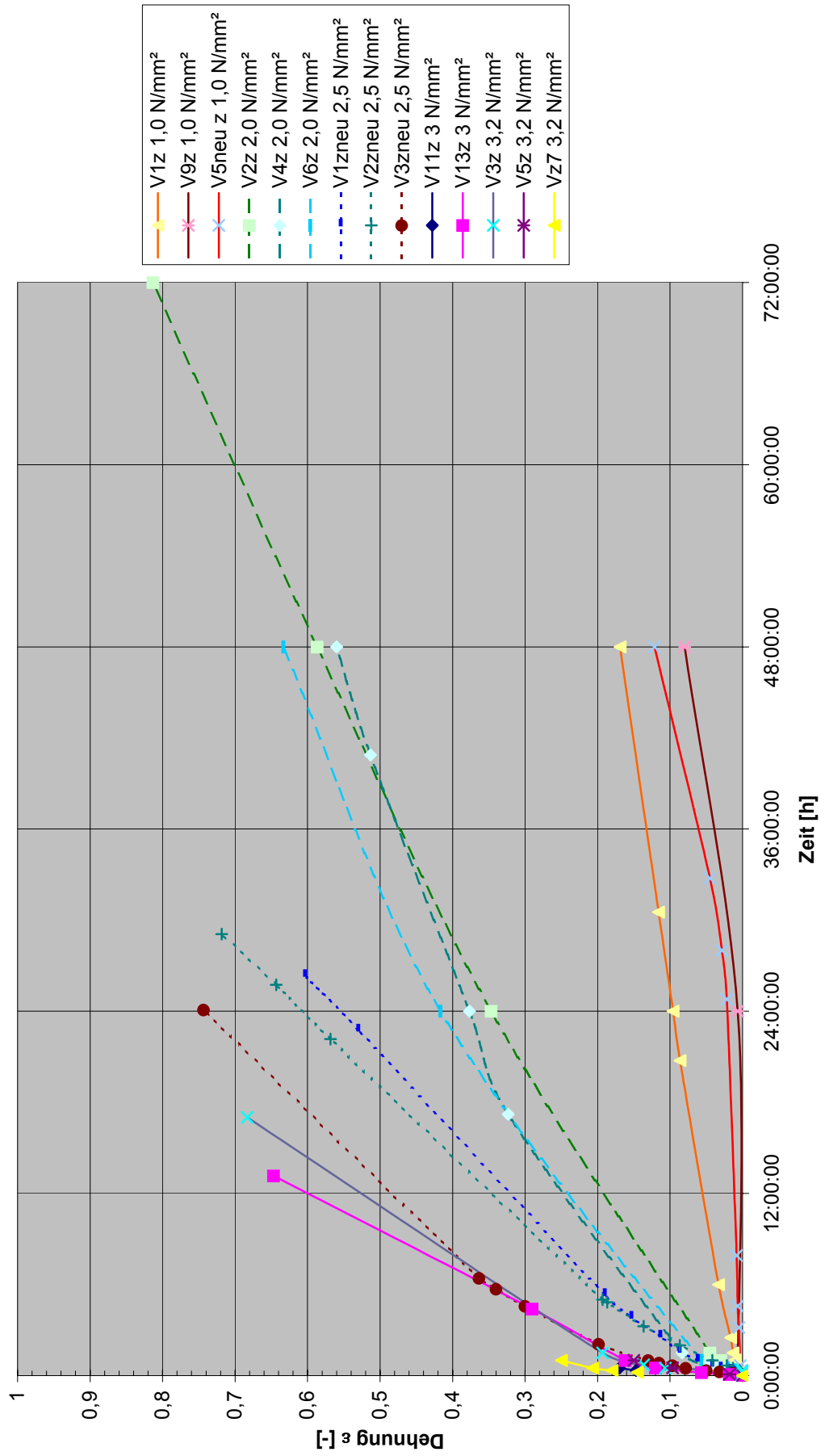




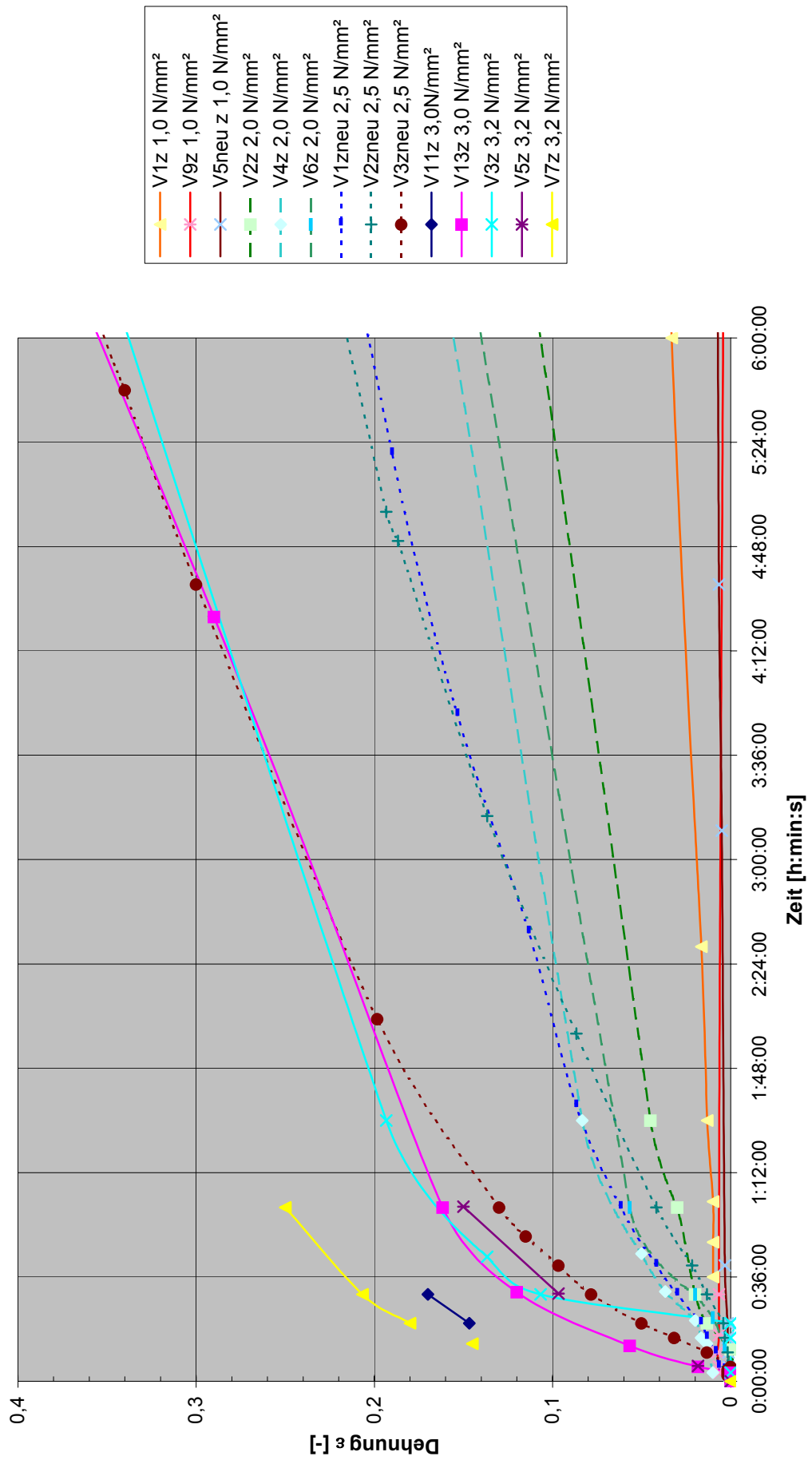
$\epsilon/t$  Diagramm bei einer Normalspannung von 3,2 N/mm<sup>2</sup> für gebrochenes VSG



$\epsilon/t$  Diagramm Versuchsergebnisse gebrochenes VSG



$\epsilon/t$  Diagramm Versuchsergebnisse gebrochenes VSG





## Anhang 5

### Untersuchung der Biegesteifigkeit des gebrochenen VSG mit Biegeversuchen

#### Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Versuchsaufbau .....	2
3	Versuchsablauf.....	4
4	Ergebnisse .....	4
5	Nachrechnung .....	10
5.1	Quellcode Sofistik.....	10

## 1 Einleitung

Zur Ermittlung der Restbiegesteifigkeit des gebrochenen VSG wurde eine Versuchsreihe durchgeführt. Es wurden insgesamt vier Probekörper in einem Biegebalkenversuch unter Eigengewicht getestet.

Da die Steifigkeit des gebrochenen VSG so gering ist, dass Effekte aus der Auflagerung und der Lasteinleitung die Ergebnisse stark beeinflussen würden zu befürchten war, wurden keine Zusatzlasten aufgebracht.

Die Versuche wurden, wie die Zugversuche auch, bei einer Temperatur von 10°C durchgeführt.

## 2 Versuchsaufbau

Der Biegeversuch wurde aufgrund der erwarteten Verformung so ausgelegt, dass die Verschieblichkeit des Lagers möglichst gut funktionierte. Dies wurde über eine Kombination von Pendelstäben und Rollenlagern erreicht.

Unmittelbar an den Biegebalken wurden Pendelstäbe angeschlossen, die kleine Auflagerverschiebung des Biegebalkens durch eine Pendelbewegung ausgleichen können. Zur Aufnahme größerer Verformungen wurde zur Aufhängung der Pendelstäbe ein kugelgelagerter Rundstab angebracht, der auf einen Stahlträger rollen konnte.

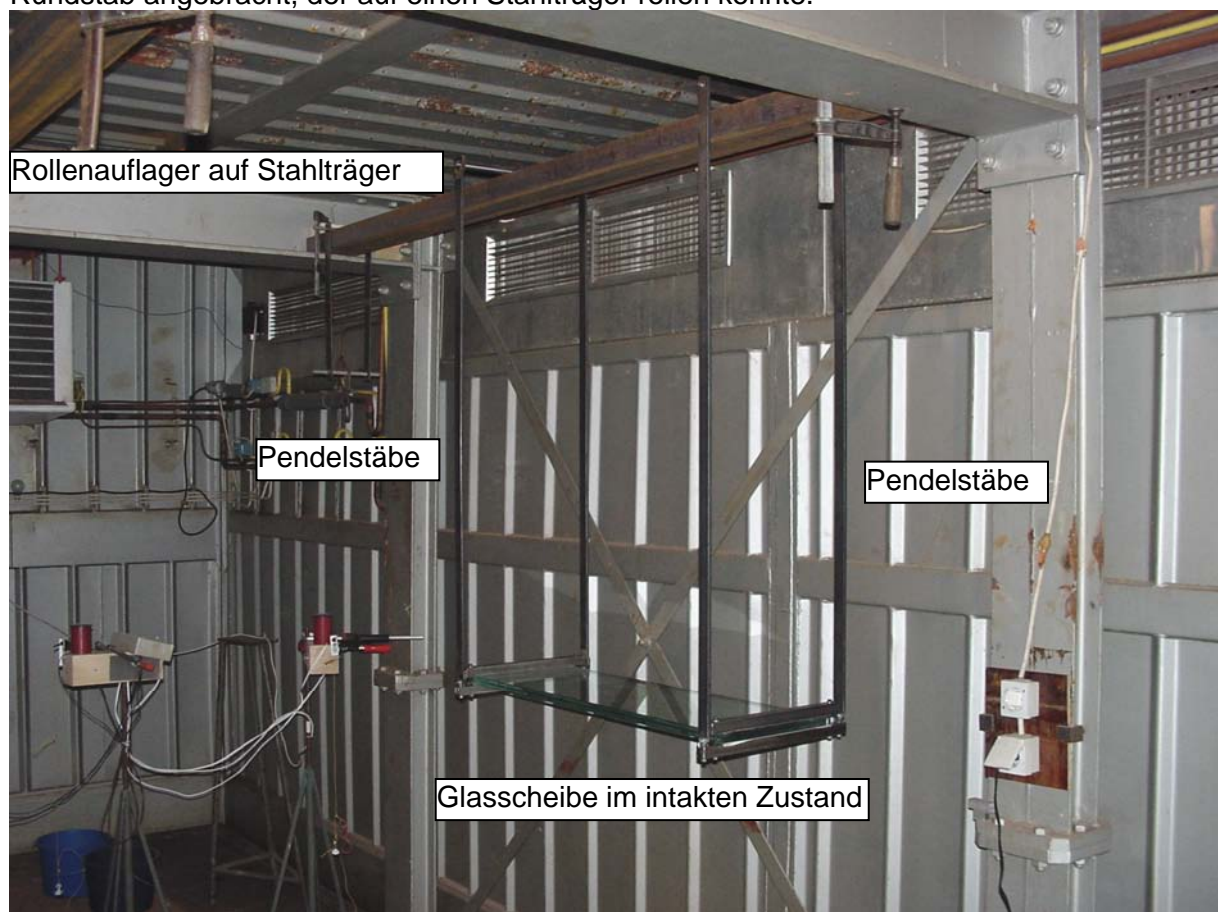
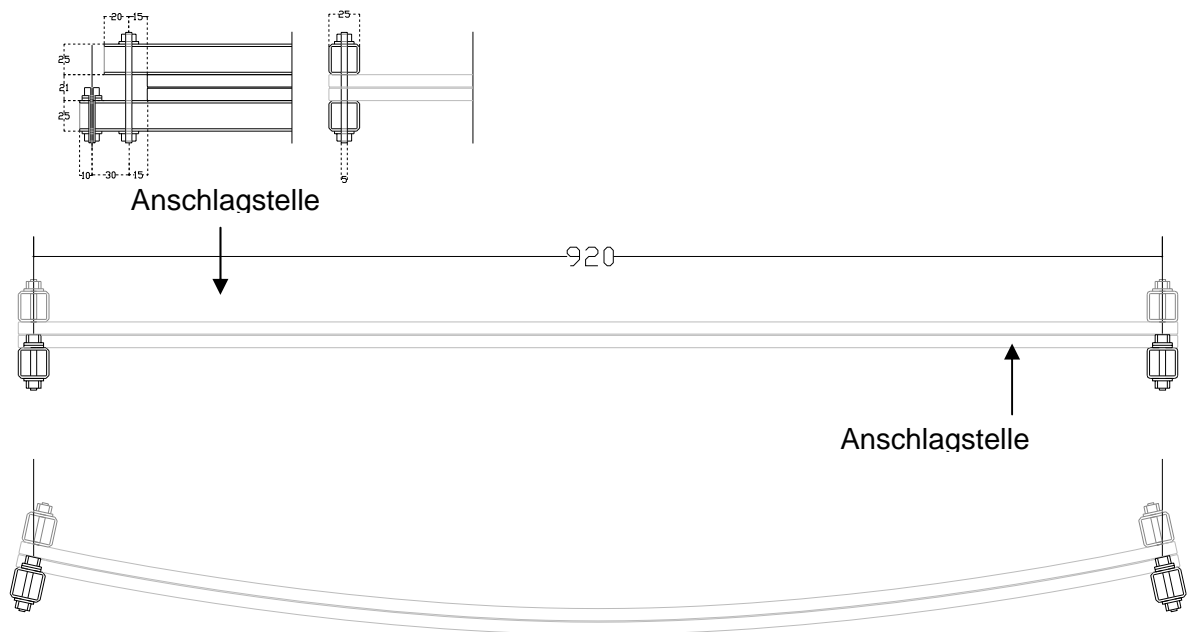


Abbildung 1 Lagerung der VSG Scheiben im Biegebalkenversuch

## Anhang 5

Das Glas wurde mit zwei Quadratrohren festgeklemmt und zusätzlich mit doppelseitigem Klebeband eingeklebt. Das Klemmlager wurde an den etwas überstehenden unteren Quadratrohren aufgehängt, so dass sich die Lagerung VSG-Scheibe auf Höhe der Folie befand.



**Abbildung 2 Zeichnung des Biegeversuchsaufbaues**

Da einige Probekörper bei den Folienzugversuchen bei einer Belastung von über 4 N/mm<sup>2</sup> versagten, sollte diese Zugspannung in der Folie bei den Biegeversuchen nicht überschritten werden.

Die Probekörperlänge der drei Probekörper wurde so gewählt, dass die theoretische Zugspannung in der Folie unter Eigengewicht 4 N/mm<sup>2</sup> betrug.

Um die gewünschte Spannung in der Folie zu erhalten, musste der Probekörper eine Länge von:  $l^2 = \sigma \cdot t_f \cdot h^3 / (t_g \cdot g)$  haben.

Mit

$t_f = 1,52 \text{ mm}$	Dicke der Folie
$t_g = 20 \text{ mm}$	Dicke beider Scheiben
$g = 25 \text{ kN/m}^3$	Masse des Glas ( $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ N/mm}^3$ )

und einer angenommenen statischen Höhe von:

$$h = t_{\text{Glas}} - 2 \text{ mm}_{(\text{Abbruch bei ESG Kanten})} + t_{\text{Folie}} / 2 = 10 - 2 + 1,52 / 2 = 8,76 \text{ mm.}$$

folgt:  $l = 923 \text{ mm}$

Zur Untersuchung des Biegeverhaltens bei geringer Anfangsspannung wurde ein Versuch mit einer Spannung von 0,85 N/mm<sup>2</sup> und einer Probekörperlänge von 425 mm durchgeführt.

### **3 Versuchsablauf**

Die Scheiben wurden mit einem Hammer an den in Abb. 2 verzeichneten Stellen auf der Ober- und Unterseite des Probekörpers angeschlagen.

Die Anschlagpunkte wurden so gewählt, dass ein gleichmäßiges Bruchbild in der gebrochenen Scheibe entstand.

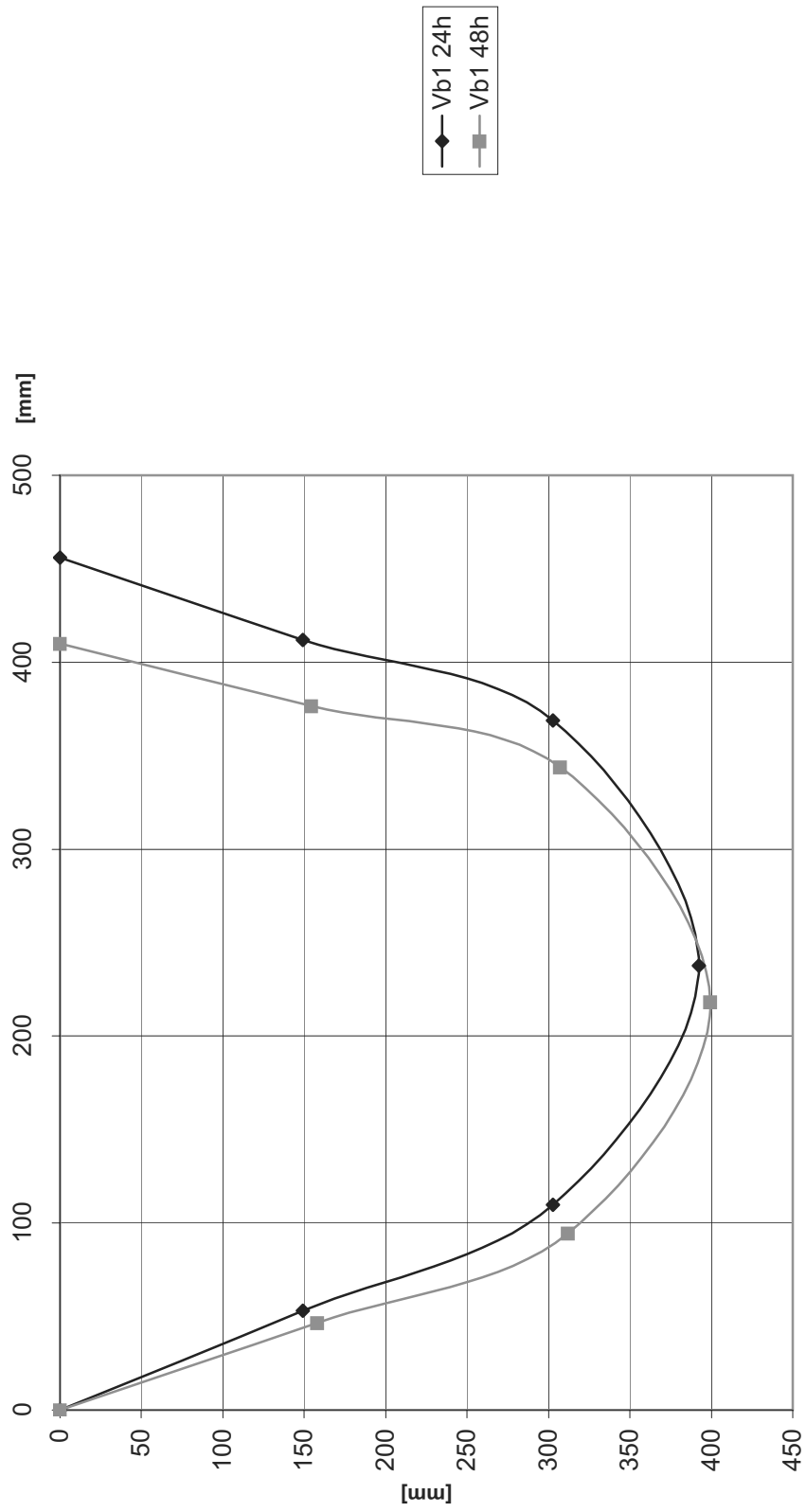
Die Verformungen in vertikaler und horizontaler Richtung wurden zu mehreren Zeitpunkten bis zu 48 h gemessen und fotografisch festgehalten. Aufgrund des anfänglich schnellen Verformungsfortschrittes konnten die Verformungen zu Beginn des Versuches nicht aufgezeichnet werden.

### **4 Ergebnisse**

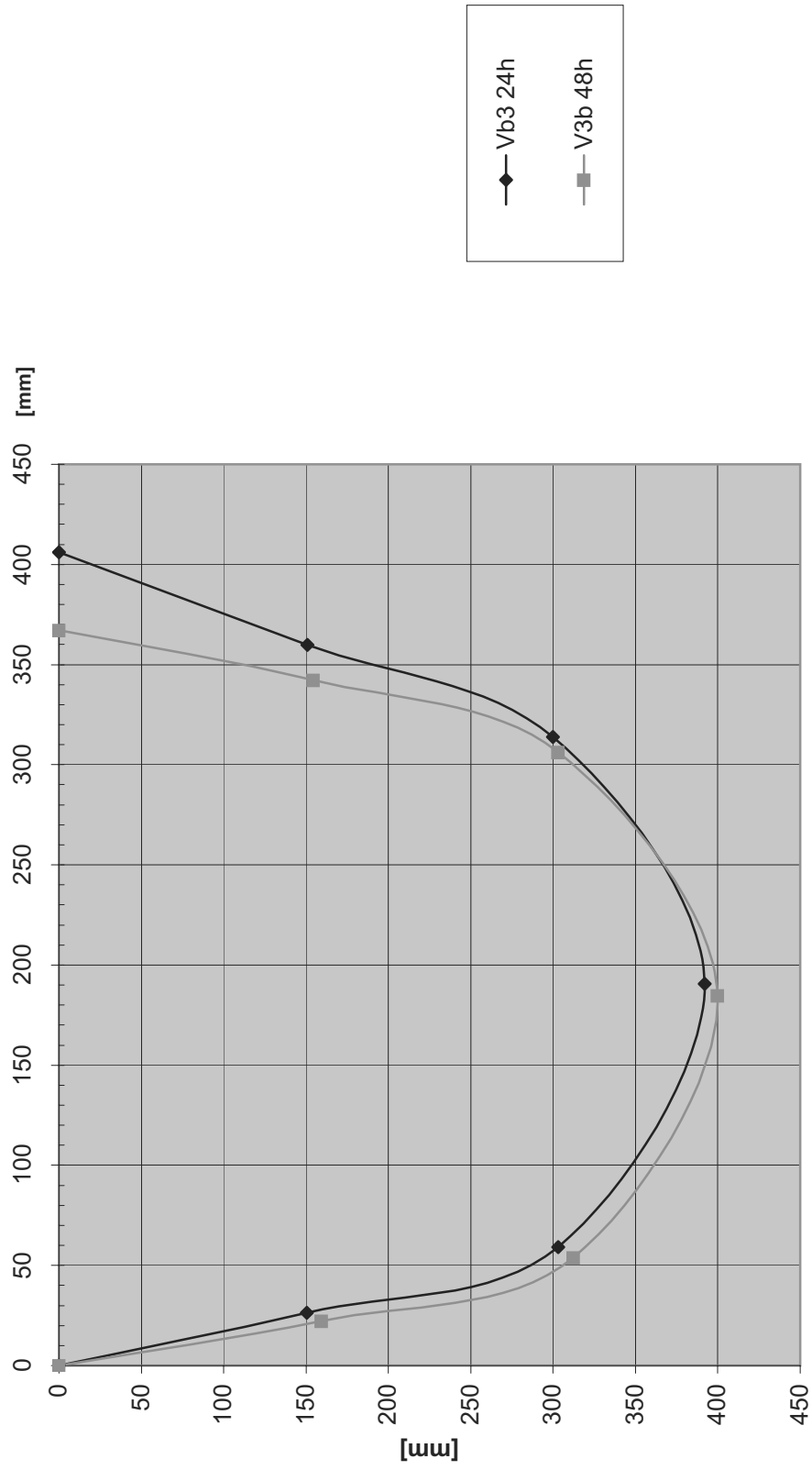
Im folgenden werden die Verformungen nach 24h und 48h aufgeführt, welche als Grundlage für die Berechnung der Steifigkeit des gebrochenen VSG herangezogen wurden.



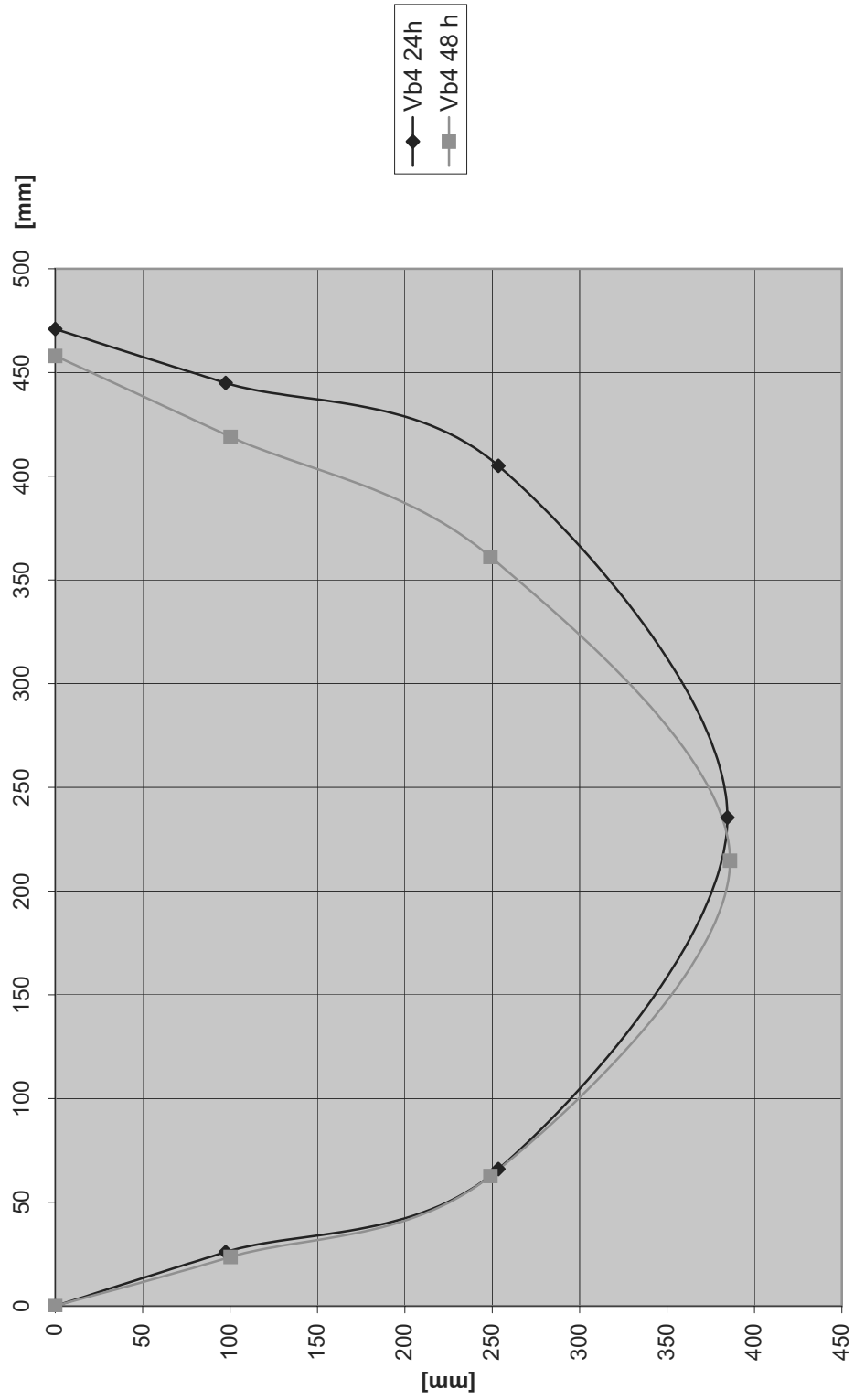
Biegeversuch an gebrochenem VSG, Verformungen des Probekörpers Vb1  
nach 24h und 48h



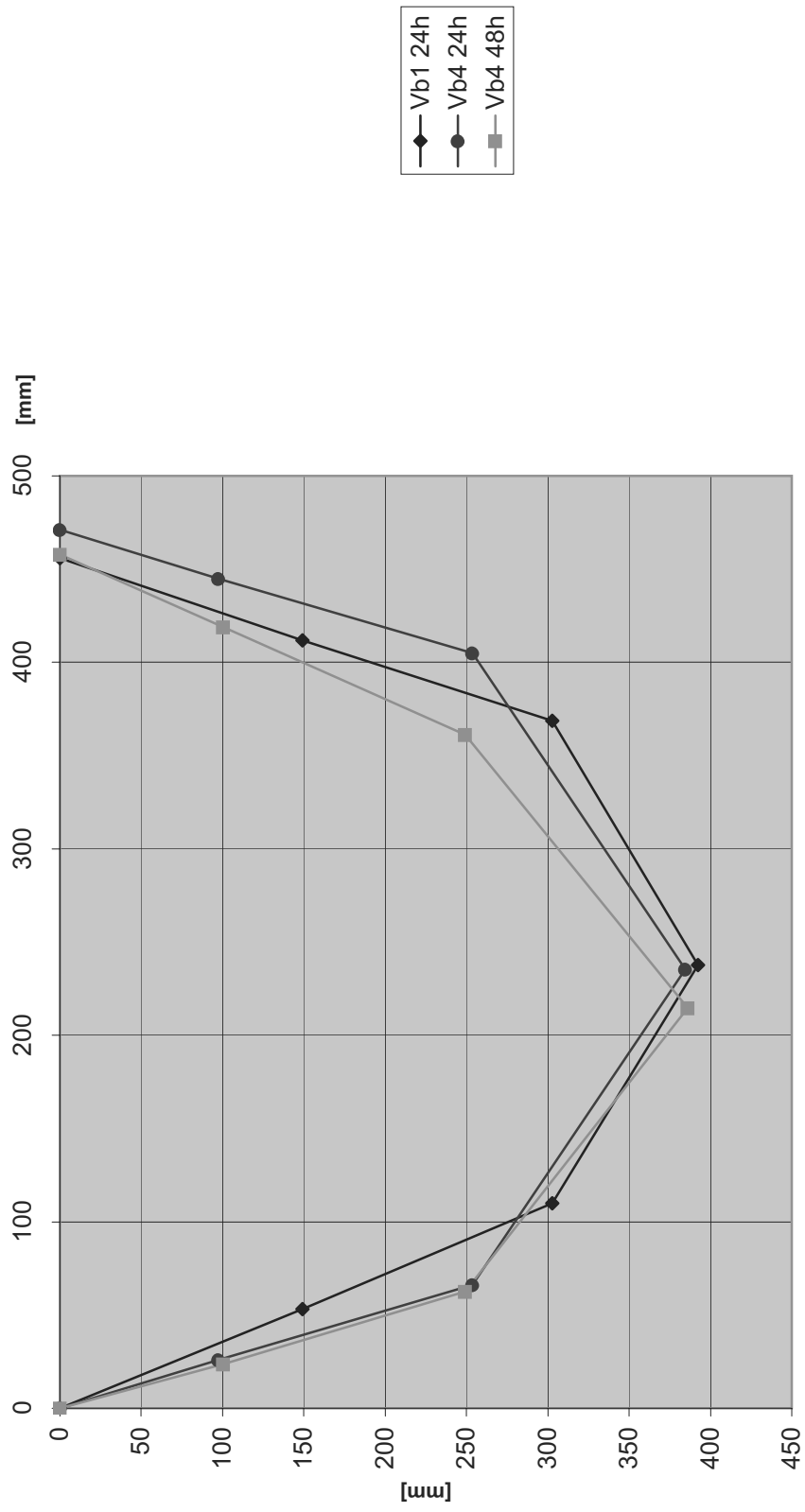
Biegeversuch an gebrochenem VSG, Verformungen des Probekörpers Vb3  
nach 24h und 48 h



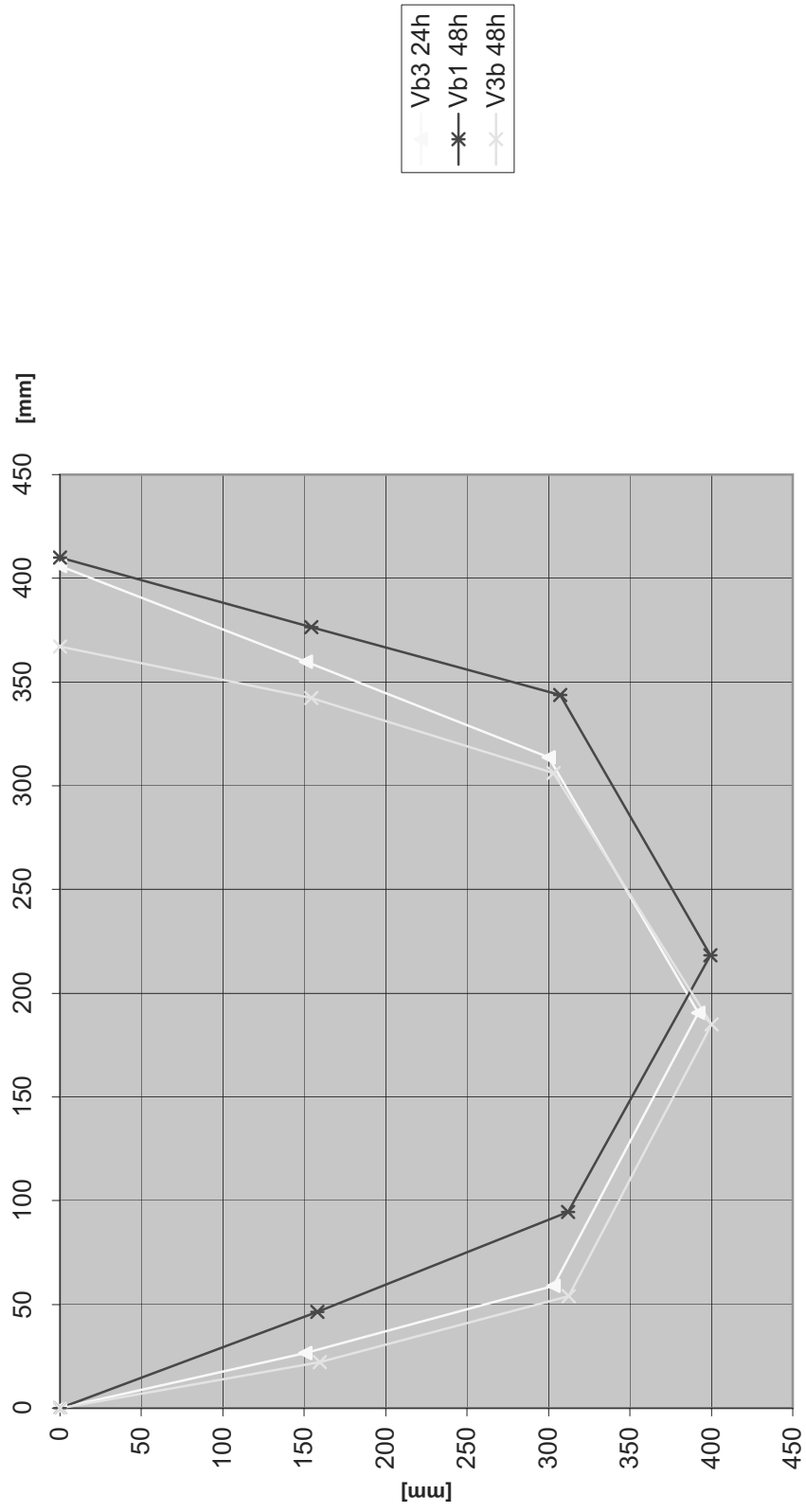
**Biegeversuch an gebrochenem VSG, Verformungen des Probekörpers Vb4 nach 24 h und 48 h**



Biegeversuch an gebrochenem VSG, Verformungen der Probekörper Vb1, Vb3, Vb4  
nach 24h



Biegeversuch an gebrochenem VSG, Verformungen der Probekörper Vb1, Vb3, Vb4  
nach 48h



## **5 Nachrechnung**

Die Versuche wurden mit dem Computerprogramm „ase“ von Sofistik nach Theorie III Ordnung nachgerechnet. Anhand dieser Nachrechnung wurde die Steifigkeit der Scheiben bestimmt. Es wurde vorausgesetzt, dass der E-Modul und die Dehnsteifigkeit unter Zug und Biegebeanspruchung gleich sind. Der Querschnitt wurde dann so angepasst, dass sich die Biegelinie des berechneten Querschnitts und des Probekörpers entsprachen. Die Überprüfung der Computerberechnung befindet sich im Hauptteil der Arbeit.

### **5.1 Quellcode Sofistik**

1. Konstante Steifigkeit über den gesamten Querschnitt, Kriechen auch in den gering beanspruchten Bereichen.
2. Kein Kriechen in den Randbereichen und angepasstes Kriechen.

## Anhang 5

061215bi egebal ken2005\_econst. dat

```
+PROG AQUA urs: 62
KOPF 1 m Breite 1,52 Folie 10 mm Glas
$ Berechnung des Biegebalkenversuches mit konstanter Steifigkeit
SEIT NRST 1 UNIE 0 FORM 0
ECHO QUER ja; ECHO MAT ja
$ Gebrochenes Glas Biegung Vergleichsrechnung mit einer Steifigkeit
mate 1 E 51 mue 0. gam 25 $phi=51/4. 2-1=11.14
qb 1 mnr 1 h 0.085 b 0.0054 bez Spannunghoch
mate 2 E 51 mue 0. gam 25 bez glasbiegung $phi=51/4. 2-1=11.14
qb 2 mnr 2 h 0.085 b 0.0054 bez glas $A=2*1.52mm*300mm=456mm^2
```

```
ENDE
-prog aqup urs: 61
kopf
mat 3
ende
```

```
+PROG GENF urs: 63
KOPF glasbal ken
SEIT NRST 1 UNIE 0 FORM 0
ECHO VOLL ja; ECHO QUER ja; ECHO MAT ja
SYST rahm GDIV 1000 gdir yy fixs frei
```

```
let#ix 10 $ Anz. der Teilungen
let#l 0.925 $ Spannweite
let#x -#l/2 $ Anfangswert x
let#dx #l/#ix
let#h -0.0 $ Stich der Anfangsverformung
let#m #h/(#l/2)^2 $ Steigung der Anfangsverformung
let#nr 1 $ Knotennummer
```

```
$ Schleife
let#ixv #ix $ ix Variable
$ parabel z= m*x^2-h+0.01
loop #ixv+1
knot #nr #x #m*(#x)**2-#h+0.01 $ Veränderung von z
let#nr #nr+1
let#ixv #ixv-1
let#x #x+#dx
endloop
```

```
knot 11 fix xp $Auflager
knot 1 fix pp $Auflager
```

```
stab 1 1 2 qnr 2 $Stäbe
stab 2 2 3 qnr 2
stab 2003 3 4 qnr 2
stab 2004 4 5 qnr 2
stab 1005 5 6 qnr 1
stab 1006 6 7 qnr 1
stab 2007 7 8 qnr 2
stab 2008 8 9 qnr 2
stab 9 9 10 qnr 2
stab 10 10 11 qnr 2
```

ENDE

```
-PROG GRAF urs: 64
KOPF Datei: D:\PROG\SOFI STIK\SOFI STIK. 99\ 28.01.02
SIZE DINA lp M 0 RAND nein FORM stan
SCHR 0.20 0.20 0.18 0.16 FAKB 0.65
```

```
STRU KONT
STRU 1 0
```

## Anhang 5

061215bi egebal ken2005\_econst. dat

```
STRU 0 1
KNOT TYP fix; und; STRU NRQ 0
QUAD TYP D SCHR 0.18
BEOB STAN 3 5 -2 posz; STRU QUER 0 $ incl. Querschnittskonturen
ENDE
```

```
+PROG ase urs: 65
KOPF Aufbringen der Last1
SYST PROB th3 ITER 100 tol 0.000001 fmax 1.588 fmin 0.2
grup 0, 1, 2
lf 1 egy 0.0 egx 0
last (2 10 1) py 0.013875 $0.02*0.3*25*0.925/81 0.013875
last 11 px 0.001
ENDE
```

```
+PROG ase urs: 59
KOPF Kriechen der Folie1
```

```
SYST PROB th3 ITER 100 plf 1 tol 0.0000001 fmax 1
krie NKRI 99 ro 0.0
grup 0 phis 0
grup 1 phis 11.14
grup 2 phis 11.14
lf 17 egy 0. egx 0
lc 1
ENDE
```



## Anhang 5

061215bi egebal ken2005\_5. dat

```
+PROG AQUA urs: 62
KOPF 0,925 m Breite 1,52 Folie 10 mm Glas
$ An beanspruchung angepasstes Kriechen
SEIT NRST 1 UNIE 0 FORM 0
ECHO QUER ja; ECHO MAT ja
$ Gebrochenes Glas Biegung Vergleichsrechnung mit einer Steifigkeit
mate 1 E 51 mue 0. gam 25 $phi=51/3.79-1=12.45
qb 1 mnr 1 h 0.085 b 0.0054 Bez Spannunghoch
mate 2 E 51 mue 0. gam 25 bez glasbiegung $phi=51/5.26-1=8.7
qb 2 mnr 2 h 0.085 b 0.0054 bez glas $ SA=2*1.52mm*300mm=456mm2
```

```
ENDE
-prog aqua urs: 61
kopf
mat 3
ende
```

```
+PROG GENF urs: 63
KOPF glasbal ken
SEIT NRST 1 UNIE 0 FORM 0
ECHO VOLL ja; ECHO QUER ja; ECHO MAT ja
SYST rahm GDIV 1000 gdir yy fixs frei
```

```
let#ix 10 $ Anz. der Teilungen
let#l 0.925 $ Spannweite
let#x -#l/2 $ Anfangswert x
let#dx #l/#ix
let#h -0.0 $ Stich der Anfangsverformung
let#m #h/(#l/2)^2 $ Steigung der Anfangsverformung
let#nr 1 $ Knotennummer
```

```
$ Schleife
let#ixv #ix $ ix Variable
$ parabel z= m*x2-h+0.01
loop #ixv+1
knot #nr #x #m*(#x)**2-#h+0.01 $ Veränderung von z
let#nr #nr+1
let#ixv #ixv-1
let#x #x+#dx
endloop
```

```
$knot (2 1081 1) fix frei
knot 11 fix xp
```

```
knot 1 fix pp
```

```
stab 1 1 2 qnr 2
stab 2 2 3 qnr 2
stab 2003 3 4 qnr 2
stab 2004 4 5 qnr 2
stab 1005 5 6 qnr 1
stab 1006 6 7 qnr 1
stab 2007 7 8 qnr 2
stab 2008 8 9 qnr 2
stab 9 9 10 qnr 2
stab 10 10 11 qnr 2
```

ENDE

```
-PROG GRAF urs: 64
KOPF Datei: D:\PROG\SOFI STIK\SOFI STIK. 99\ 28.01.02
SIZE DINA lp M 0 RAND nein FORM stan
SCHR 0.20 0.20 0.18 0.16 FAKB 0.65
```

Seite 1

## Anhang 5

061215bi egebal ken2005\_5. dat

```
STRU KONT
STRU 1 0
STRU 0 1
KNOT TYP fix; und; STRU NRQ 0
QUAD TYP D SCHR 0.18

BEOB STAN 3 5 -2 posz; STRU QUER 0          $ incl. Querschnittskonturen
ENDE

+PROG ase urs: 65
KOPF Aufbringen der Last1
SYST PROB th3 ITER 100 tol 0.000001 fmax 1.588 fmin 0.2      $0,06
grup 0,1,2
lf 1 egy 0.0 egx 0
last (2 10 1) py 0.013875 $0.02*0.3*25*0.925/81 0.013875
last 11 px 0.001
ENDE

+PROG ase urs: 59
KOPF Kriechen der Folie1
SYST PROB th3 ITER 100 plf 1 tol 0.0000001 fmax 1
krie NKRI 99 ro 0.0
grup 0 phis 0          $wenn die Randstäbe sich nicht dehnen wird nur der
Gesamtdurchhang geringer nicht das zusammenziehen
grup 1 phis 12.45
grup 2 phis 8.7
lf 17 egy 0. egx 0
lc 1
ENDE
```

## Anhang 6

### Ermittlung der Reibung zwischen gebrochenem VSG und Stahl bzw. gebrochenem VSG und Neopren anhand von Reibungsversuchen

#### Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung .....	2
2	Vorversuch / Reibung auf den Zugstäben .....	2
3	Versuchsaufbau Reibungsversuche .....	3
4	Versuchsdurchführung.....	4
5	Ergebnisse .....	5

## 1 Einleitung

Bei der Ermittlung der Resttragfähigkeit des Glasbogens war die Frage zu klären in wie weit die Reibung des gebrochenen Glases am Auflager und auf den Stahlzugstäben ein Abrutschen der gebrochenen VSG-Scheiben verhindern kann.

Ziel der Versuche war es den Haftreibwiderstand zwischen Glas und Stahl bzw. gebrochenem VSG und Neopren (Shorehärte 65) für eine Belastungsdauer von 48h zu ermitteln.

Um dies zu untersuchen wurden folgende Versuche durchgeführt:

## 2 Vorversuch: Reibung auf den Zugstäben

Ein Vorversuch hatte gezeigt, dass bei einer Auflast von 5 kg zuzüglich des Eigengewichtes eine Zugkraft von bis zu 4 kg übertragen werden kann. Durch die Auflast werden die Glassplitter zusätzlich in den Stahl eingedrückt. Bei großer Auflast ist somit ein  $\mu > 0,4$  zu erwarten.

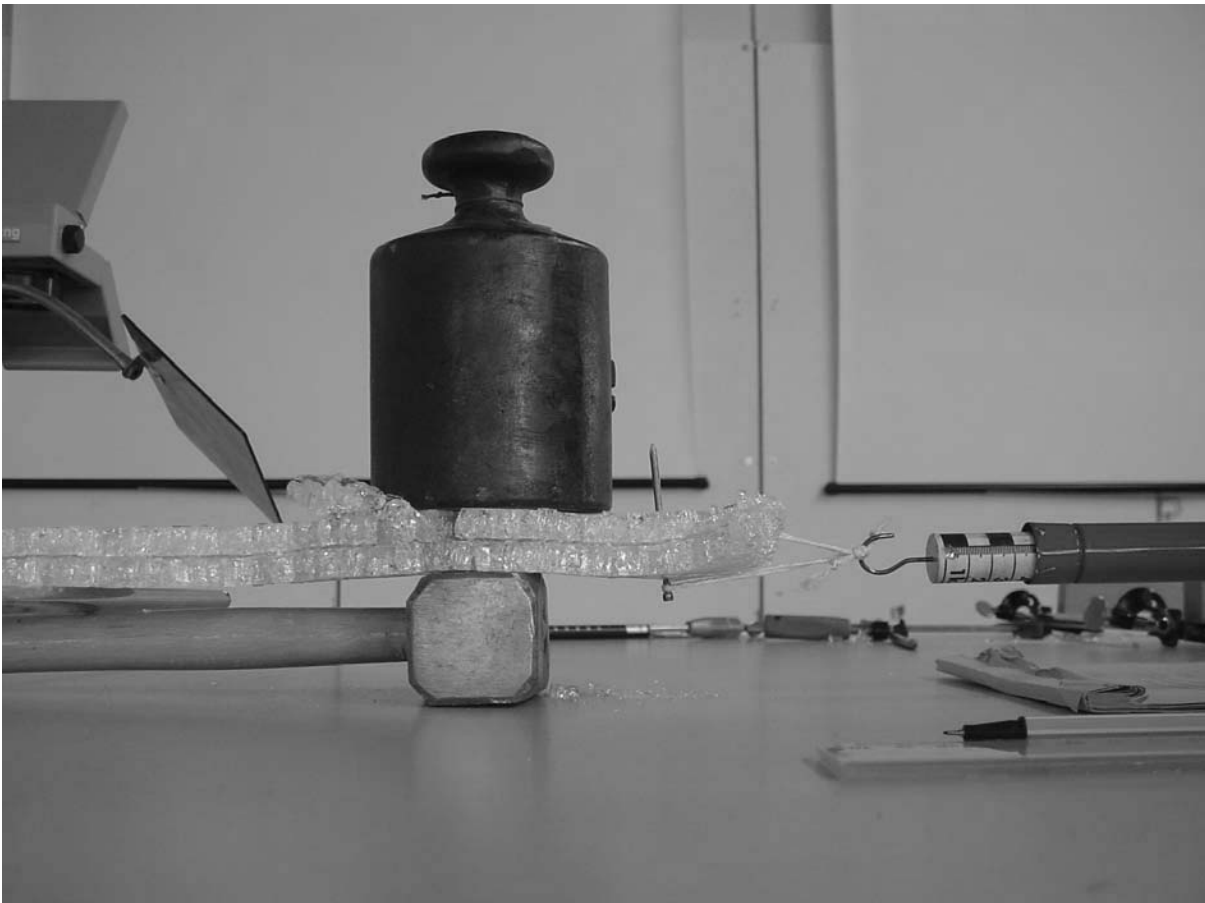
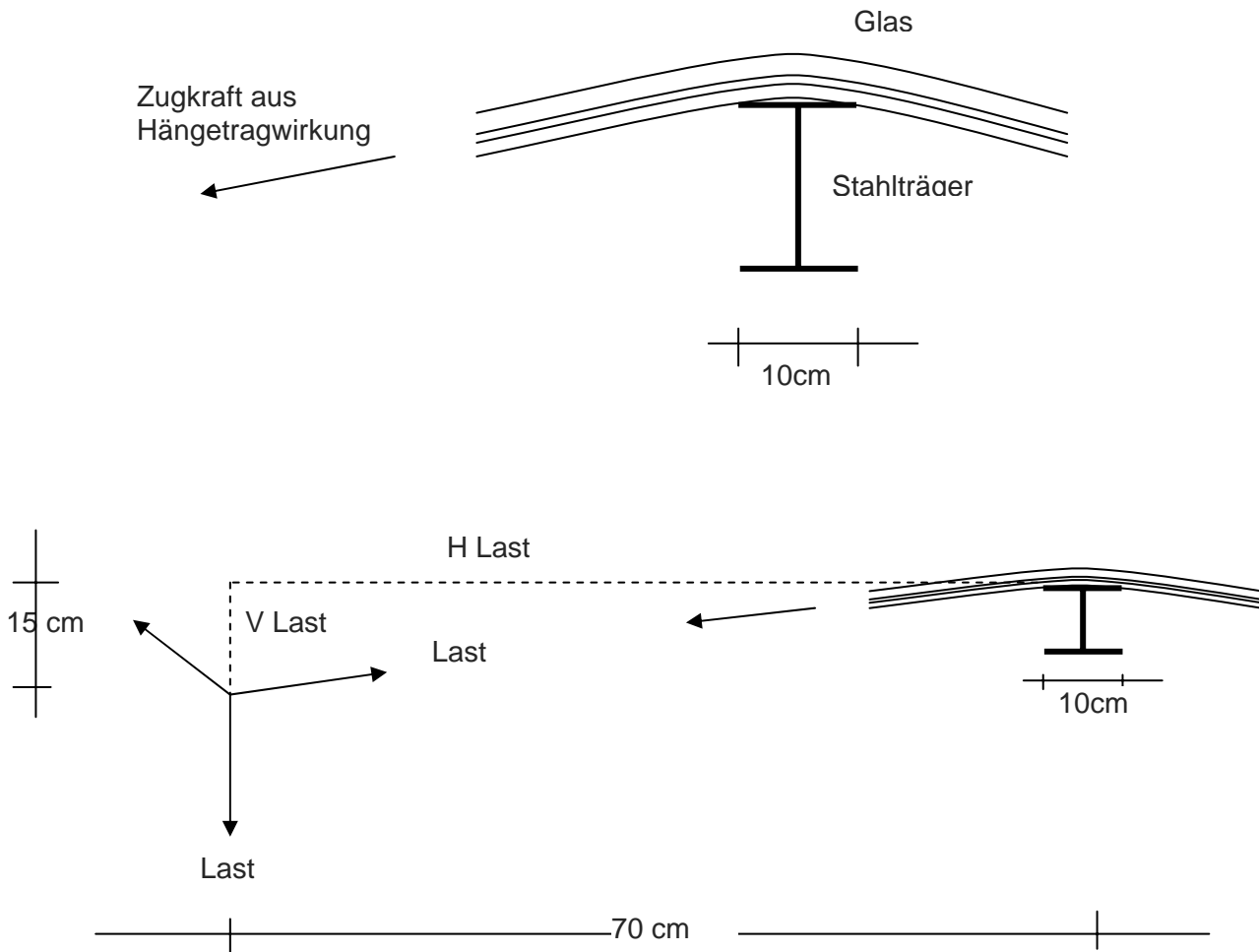


Abbildung 1: Vorversuch bei 20°C

### 3 Versuchsaufbau Reibungsversuche

Der Versuchsaufbau der Reibungsversuche wurde in Anlehnung an die Situation am Auflager der Glasbögen mit Zugstab gestaltet. Die Glashalter haben eine Breite von 10 cm. Darüber kann sich die gebrochene Glasscheibe legen. Die Glasscheibe trägt zwischen den Auflagern wie ein Hängewerk. Die notwendigen Zugkräfte im Auflager des Glasbogens mit Zugstab müssen durch räumliche Tragwirkung und Reibung zwischen Glas und Stahl erzielt werden.



### Abbildung 2: schematische Darstellung des Versuchsaufbaues

Da die Glasscheibe im Verlauf der Zeit an den Seiten langsam herunter hängt, wurde die horizontale Zugkraft entsprechend der Situation im Hängetragwerk von vornherein leicht geneigt angesetzt.

Die horizontale Zugkraft wurde über eine mit einer Rolle umgelenkte Gewichtskraft erzeugt. So konnte eine über die Zeit konstante Beanspruchung erzeugt werden.

Reibungserzeugende Auflast:

Eigengewicht:  $0,3\text{m} \cdot 0,4\text{m} \cdot 0,02\text{m} \cdot 25\text{kN/m}^3 = 0,06 \text{ kN}$

+

Auflast aus Zugkraft:  $\text{Last} \cdot 15 / 71,6$  (Länge der Hypotenuse des Dreiecks 71,6 cm)

Horizontalkraft:

H Kraft:            =        Last  $\cdot 70 / 71,6$

## 4 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in der Klimakammer bei 10°C über einen Zeitraum von 48h durchgeführt. Für die Versuche wurden zum Teil neue Scheiben angeschlagen, zum Teil wurden Scheiben verwendet, die zuvor in den Zugversuchen nur einer sehr geringen Zugkraft ( $0,7 \text{ N/mm}^2$  -  $1 \text{ N/mm}^2$ ) ausgesetzt worden waren.

Als Auflager wurde ein Stahlträger HEB 100 mit abgerundeten Kanten gewählt. So war ein Verzahnen an einer scharfen Kante nicht möglich.

Neben den Versuchen mit Glas auf Stahl wurden auch Versuche mit Stahl auf Gummi durchgeführt, da im Glashalter des Glasbogens noch ein Neopren zwischen den Stahl und das Glas eingelegt wird.



Abbildung 3: Versuchsaufbau in der Klimakammer

## 5 Versuchsergebnisse

Tabelle 1: Ergebnisse der Reibungsversuche gebrochenes VSG auf Stahl/Neopren

Versuchsnummer	Ergebnis 48h gehalten	Reibungsart	Last kg	H Last	Auflast aus Last V kg	Eigengewicht Scheibe V kg	H Last/V Last= $\mu$
V1.1	ja	Glas/Stahl	4	3,91	0,84	6	0,57
V1.2	ja	Glas/Stahl	5	4,89	1,05	6	0,69
V2.1	ja	Glas/Stahl	4	3,91	0,84	6	0,57
V2.2	ja	Glas/Gummi	4,5	4,40	0,94	6	0,63
V3.1	ja	Glas/Stahl	3	2,93	0,63	6	0,44
V3.2	ja	Glas/Stahl	3	2,93	0,63	6	0,44
V3.3	ja	Glas/Gummi	3	2,93	0,63	6	0,44
V4.1	nein	Glas/Gummi	4	3,91	0,84	6	0,57
	nein	Glas/Stahl	3,5	3,42	0,73	6	0,51
	nein	Glas/Gummi	3,5	3,42	0,73	6	0,51
V4.2	ja	Glas/Stahl	3	2,93	0,63	6	0,44
V4.3	ja	Glas/Gummi	3,5	3,42	0,73	6	0,51
V4.4	ja	Glas/Gummi	4	3,91	0,84	6	0,57
V5.1	ja	Glas/Stahl	3,5	3,42	0,73	6	0,51
V5.2	ja	Glas/Gummi	3,5	3,42	0,73	6	0,51
mögliche Reibung							
		Glas/Stahl	3	2,93	0,63	6	<b>0,44</b>
		Glas/Gummi	3	2,93	0,63	6	<b>0,44</b>
gebogen $\mu =$							0,62

Es war zu beobachten, dass sich die scharfkörnigen Splitter in den Stahl kratzten und so die Reibung erhöhten.

Im Bereich der Zugstäbe ist ebenfalls keine Kante vorhanden. Ein Einhängen einzelner Glaskörner ist so nicht zu erwarten.

V1 stark gebogen

V2 leicht gebogen

→ gebogen  $\mu=0,62$

V3, V4, V5 neue ebene Scheiben

Bei ebenen frischgebrochenen VSG-Scheiben wurde ein Reibungswiderstand von  $\mu = 0,44$  ermittelt. Es handelt sich hierbei um den ermittelten Mindestreibbeiwert. Für die Ermittlung von Fraktilwerten war diese Versuchsreihe zu klein.

## 6 Zusammenfassung

Der geringste festgestellte Reibungswiderstand zwischen Glas und Stahl bzw. Glas und Neopren beträgt:

**$\mu = 0,44$**

Dieser Wert wird auch für die Berechnung der Resttragfähigkeit verwendet.





# Anhang 7

## Berechnung der Resttragfähigkeit

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Stabwerk, Stäbe und Knoten .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Belastung.....</b>	<b>4</b>
3.1	Eigengewicht .....	4
3.2	Schnee .....	5
<b>4</b>	<b>Berechnungscode.....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Berechnung und Nachweise .....</b>	<b>16</b>
5.1	Kräfte, Verschiebungen und Spannungen nach dem Aufbringen der Last.....	16
5.1.1	Nachweis der Stäbe zu Beginn der Belastung:.....	17
5.1.2	Kriechen des Stabwerkmodells bis zum Herunterfallen der Schneelast .....	19
5.1.3	Nach dem Herunterfallen der Lasten am Scheibenrand.....	20
5.2	Verformungen, Kräfte und Spannungen nach 24 h .....	21
5.2.1	Nachweis der Stäbe und Knoten nach 24 h.....	23
5.2.2	Biegung .....	25
5.2.3	Verformung am Auflager von Glas und Stahlzugstab:.....	26
5.2.4	Vergleich der Berechnungen mit den Versuchsergebnissen.....	28
5.3	Verformungen, Kräfte und Spannungen nach 48 h .....	29
5.3.1	Berechnung der Verformung im Glas am Auflager von Glas und Stahlzugstab:.....	30
5.3.2	Verformung des Gesamtsystems.....	31
<b>6</b>	<b>Stabwerk zur Untersuchung der Drucktragfähigkeit der Falte .....</b>	<b>33</b>
6.1	Geometrie.....	34
6.2	Material/Querschnitte .....	34
6.2.1	Druckstäbe: .....	34
6.2.2	Biegestäbe .....	35
6.3	Belastung aus dem Gesamt-Stabwerkmodell nach 24 h .....	37
6.4	Ergebnis der Berechnung .....	39
<b>7</b>	<b>Genauere Berechnung des Stabes 20, Belastungsdauer 24 h .....</b>	<b>42</b>
7.1	Material und Querschnitte .....	43

## Anhang 7

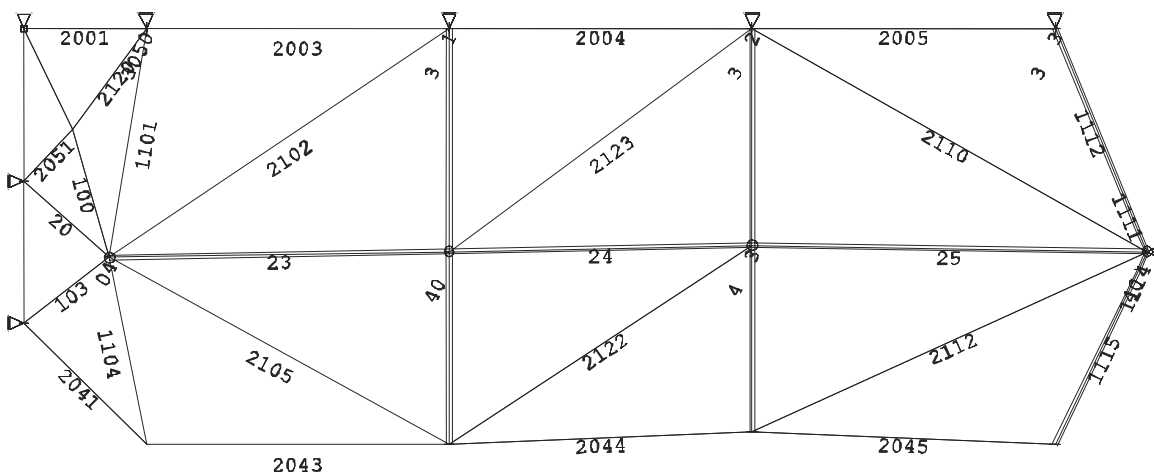
7.1.1	Material.....	43
7.1.2	Querschnitte .....	43
7.2	Belastung .....	44
7.3	Ergebnis .....	47
7.3.1	Vergleich über Knickberechnung .....	48
<b>8</b>	<b>Genauere Berechnung des Stabes 20, Belastungsdauer 48 h .....</b>	<b>49</b>
8.1	Material und Querschnitte .....	49
8.2	Belastung .....	49
8.3	Ergebnis: .....	50

# 1 Einleitung

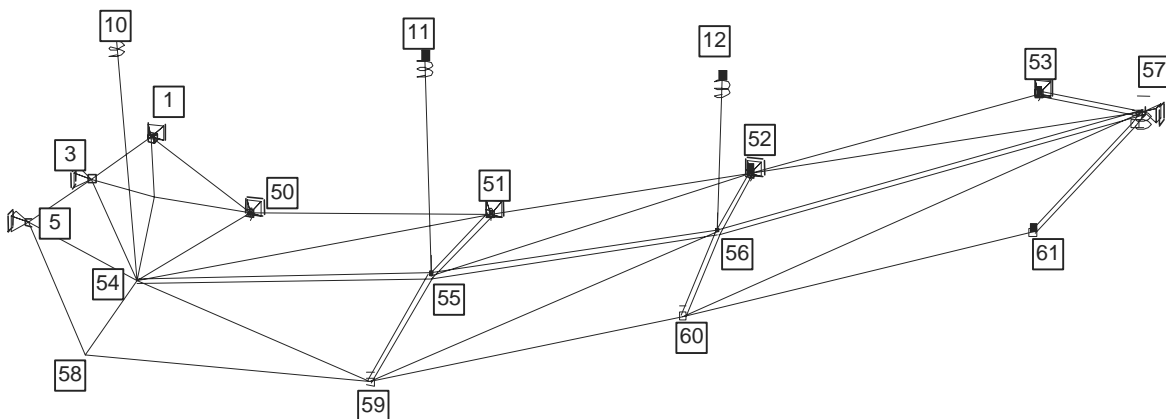
Im folgenden wird die im Haupttext vorgestellte Berechnung zur Resttragfähigkeit ergänzt.

## 2 Stabwerk, Stäbe und Knoten

Die Entwicklung des Stabwerkmodells ist in Kap. 7.3 f. beschrieben. Zur Erläuterung der Berechnung wird hier die Stabnummerierung nochmals aufgeführt.



### Abbildung 1: Stabnummern



**Abbildung 2: Knotennummern. Die Knoten 70-75 zur Biegebeanspruchungsermittlung, welche direkt neben den Knoten 55 (74, 75), 56 (72, 73), 57 (70, 71) liegen, wurden ausgeblendet.**

### 3 Belastung

Als Belastung im Resttragfähigkeitsfall wird neben dem Eigengewicht die halbe Schneelast mit  $0,625 \text{ kN/m}^2$  angenommen (siehe Kapitel 4). Wie im Kapitel 4 erläutert wurde, fällt die Schneelast an den Scheibenrändern herunter, nachdem sich diese geneigt haben.

#### 3.1 Eigengewicht

Als Eigengewichtslast wird die Dicke des Glases von  $2 \times 10 \text{ mm}$  mit einer Masse von  $25 \text{ kN/m}^3$  als konzentrierte Knotenlast aufgebracht.

Die Einflussbreite eines Randknotens beträgt zum freien Rand  $12,5 \text{ cm}$  und zu den Stahlzugstäben  $37,5 \text{ cm} / 2$ . Über den Stahlzugstäben wird eine Einflussbreite von  $37,5 \text{ cm}$  angenommen.

In Bogenrichtung wurden im Hängebereich und im Randbereich folgende Einflussbreiten angenommen:

**Tabelle 1: Knotenlasten aus Eigengewicht**

Knoten	Einflussbreite in y- Richtung	Einflussbreite in x-Richtung	Belastung [kN]
Knoten 1,5	0,1 m	0,3125m	0,0156
Knoten 50,58	0,1 m + 0,25 m	0,3125m	0,0547
Knoten 51,59	0,25 m*2	0,3125m	0,078
Knoten 52,60	0,5 m	0,3125m	0,078
Knoten 53,61	0,25 m+0,15 m	0,3125m	0,0625
Knoten 3	0,1 m	0,375m	0,01875
Knoten 54	0,1 m + 0,25 m	0,375m	0,065625
Knoten 55	0,25 m*2	0,375m	0,0937
Knoten 56	0,5 m	0,375m	0,0937
Knoten 57	0,25 m+0,15 m	0,375m	0,075

### 3.2 Schnee

Die angesetzte halbe Schneelast beträgt  $0,625 \text{ kN/m}^2$ . Es wird unterstellt, dass der Schnee von den Zugstäben in Richtung Scheibenmitte rutschen und sich im Hängebereich anhäufen wird. Die Knoten über den Stahlzugstäben haben keine Schneelast. So ergibt sich sowohl zwischen den Stahlzugbändern auch für den Scheibenrand eine Einflussbreite in x-Richtung von  $0,5 \text{ m}$ . In y-Richtung gilt die gleiche Einflussbreite wie beim Eigengewicht. Eine Ausnahme stellt die Falte dar, von welcher der Schnee ebenfalls abrutscht und auf Knoten 50 und 58 zum Liegen kommt.

**Tabelle 2: Knotenlasten aus Eigengewicht und Schnee**

Knoten	Einflussbreite in y- Richtung	Einflussbreite in x-Richtung	Belastung [kN] Schnee	Summe [kN] Eigengewicht+Schnee
Knoten 1,5				0,0156
Knoten 50,58	$0,2 \text{ m} + 0,25 \text{ m}$	$0,5 \text{ m}$	0,1406	0,1953
Knoten 51,59	$0,25 \text{ m} \cdot 2$	$0,5 \text{ m}$	0,1563	0,234
Knoten 52,60	$0,5 \text{ m}$	$0,5 \text{ m}$	0,1563	0,234
Knoten 53,61	$0,25 \text{ m} + 0,15 \text{ m}$	$0,5 \text{ m}$	0,125	0,1875
Knoten 3				0,01875
Knoten 54				0,06562
Knoten 55				0,0937
Knoten 56				0,0937
Knoten 57				0,075

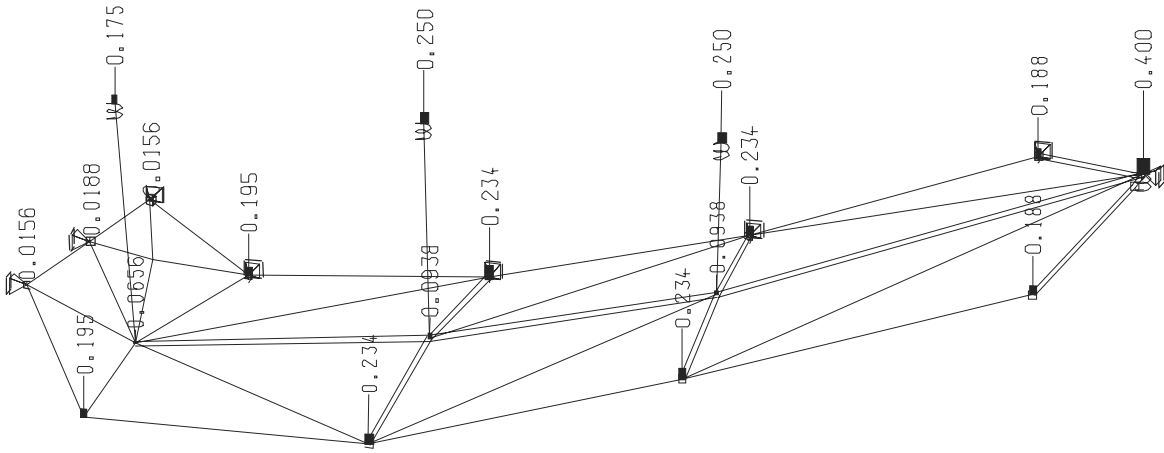


Abbildung 3: Belastung

Nach dem Herunterfallen der Schneelast vom freien Scheibenrand ist auf der Außenseite der Scheibe nur noch das Eigengewicht angesetzt.

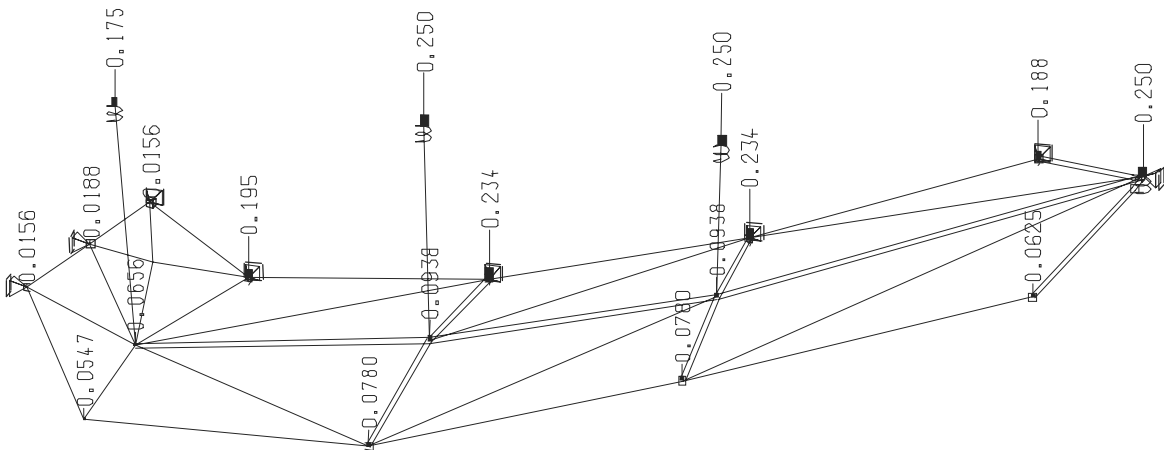


Abbildung 4: Belastung nach dem Herunterfallen des Schnees am Scheibenrand

## 4 Berechnungscode

```
+PROG AQUA urs:1
KOPF 1 m Breite 1,52 Folie 7 mm Glas
SEIT NRST 1 UNIE 0 FORM 0
ECHO QUER ja; ECHO MAT ja

$Gebrochenes Glas Druck
mate 1 E 70000 mue 0.23 gam 25 bez glasdruck
qb 1 mnr 1 h 0.01 b 0.003 ho 0.003 bo 0.02 bez glas $
$Gebrochenes Glas Biegung
mate 2 E 51 mue 0.23 gam 25 bez glasbiegung $
qb 2 mnr 2 h 0.085 b 0.0054*35/30 bez glas $ Einflussbreite 35 cm
qb 5 mnr 2 h 0.085 b 0.0045 bez glasdruckstab
qb 4 mnr 2 h 0.085 b 0.0054*50/30 bez glas $ Einflussbreite 50 cm

$Gebrochenes Glas Zug
stah 3 es 51. gam 25 bez verbundzug tmax 1000 $Wird für die Verformung und Kriechen genommen
$Ist der E Modul zu gross dann ist die Umlagerungsfähigkeit geringer d.h. die Lasten und
$Spannungen ebenfalls grösser d.h. man liegt auf der sicheren Seite
qb 3 mnr 3 h 0.00152 b 0.25 $A=0.0038m²

ENDE
+prog aqup urs:2
kopf
mat 3
ende

+PROG GENF urs:3
KOPF glas_3dstabwerk53
SEIT NRST 1 UNIE 0 FORM 0
ECHO VOLL ja; ECHO QUER ja; ECHO MAT ja
SYST raum GDIV 1000 fixs frei gdir zz
#define pi=3.141592654
$Knoten
$Welle
let#ix0 2
let#iy 2 $
let#a -0.07 $Höhe der halben Welle 0.07
let#b 0.75 $0.75 breite des Kragarmes
let#lb 0.15 $länge der Welle
let#x 0
let#dx #lb/#ix0
let#y 0
let#dy #b/#iy
let#z #a*2
let#h #b

let#nr 1
let#ixv #ix0
let#iyv #iy
loop #iyv+1
loop #ix0
knot #nr #x #y #z
let#x #x+#dx
```

## Anhang 7

```
let#z #a*cos(rad($(pi)*#x/#lb))+#a
let#nr #nr+1
endloop
let#y #y+#dy
let#x 0
let#z #a*2
endloop

knot 6 fix del
knot 2 0.09 0.175 -0.07
knot 3 y 0.24
knot 5 0 1.5*#dy-0.05 2*#a

$ Scheibe
let#ix 4
let#iy 2
$Breite des Kragarmes
let#b 0.75
let#x 0.2
let#l 1.835-#x
let#dx #l/(#ix-1)

let#y 0
let#dy #b/(#iy)
let#z 0.0 $Anfangsverformung
let#h -0.355
let#m #h/(#l)^2
let#nr 50
let#ixv #ix
let#iyv #iy

$Mitte
loop #ix
knot #nr #x #y #z
let#nr #nr+1
let#x #x+#dx-0.05
let#z #m*(#x)**2+0.02 $Anfangsverformung
endloop
knot 50 z 0.02
$Stab
let#y #y+#dy
let#x 0.2
let#z 0
loop #ix-1
knot #nr #x #y #z
let#nr #nr+1
let#x #x+#dx-0.05
let#z #m*(#x)**2
let#y #y-0.01
endloop

let#x #x+0.05*(#ix-1)
let#y #y+0.03
let#z #m*(#x)**2
knot #nr #x #y #z
let#nr #nr+1
knot 54 x 0.14
```



## Anhang 7

\$ knot 70-knot 75 zusätzlich eingeführte Knoten zur Kontrolle der Biegung über dem Stahlzugstab

```
knot 70 #x-0.013 #y-0.03 #z+0.01
knot 71 #x-0.013 #y+0.03 #z+0.01
knot 72 #x-#dx-0.1 0.325 -0.184
knot 73 #x-#dx-0.1 0.385 -0.184
knot 74 0.695 0.335 -0.064
knot 75 0.695 0.395 -0.064
$Rand
let#y #y+#dy-0.06 $Vorwegnahme der Reibungsverschiebung 5cm
let#x 0.2
let#z 0.0
loop #ix
    knot #nr #x #y #z
    let#nr #nr+1
    let#x #x+#dx-0.05
    let#z #m*(#x)**2+0.02 $Anfangsverformung
endloop
knot 58 x 0.22
knot 60 y #y-0.02 $ Vorabnahme der Reibungsverschiebung
knot 61 y #y-0.01
Knot 59 z -0.02
knot 10 x 0.14 y 0.375 z -0.447
knot 11 x 0.695 y 0.365 z -0.447
knot 12 x 1.19 y 0.355 z -0.447
```

\$Stäbe

```
grup 0
fach 1 54 10 qnr 1
fach 2 55 11 qnr 1
fach 3 56 12 qnr 1
fach 20 3 54 qnr 1

stab (23 25 1) (54 1) (55 1) qnr 1
fach 100 54 2 qnr 5
fach 50 2 1 qnr 5

fach 103 54 5 qnr 1
fach 114 1 3 qnr 1
knot 4 fix del
```

```
grup 1
fach 101 54 50 qnr 2
fach 104 54 58 qnr 2
stab 106 55 74 qnr 4
stab 1118 74 51 qnr 4 $Aachsen quer
stab 107 55 75 qnr 4 $Aachsen quer
stab 1119 75 59 qnr 4
stab 108 56 72 qnr 4 $Aachsen quer
stab 1116 72 52 qnr 4 $Aachsen quer
Stab 109 56 73 qnr 4 $Aachsen quer
stab 1117 73 60 qnr 4
stab 1111 57 70 qnr 2 $Aachsen querende mz
stab 1112 70 53 qnr 2
stab 1114 57 71 qnr 2
stab 1115 71 61 qnr 2 $Aachsen querende mz
```

## Anhang 7

grup 2

fach 1 1 50 qnr 3

fach (3 5 1) (50 1) (51 1) qnr 3 \$ 1 entlang x Achse

fach 41 5 58 qnr 3

fach 43 58 59 qnr 3 \$ 3 entlang x Achse

fach 44 59 60 qnr 5

fach 45 60 61 qnr 3

fach 102 54 51 qnr 3 \$ wenn Druck qnr 1

fach 105 54 59 qnr 1

fach 110 57 52 qnr 3

fach 112 57 60 qnr 5

fach 115 3 5 qnr 3

fach 120 50 2 qnr 3

fach 51 3 2 qnr 3

fach 122 59 56 qnr 3

fach 123 55 52 qnr 3

\$Festhaltungen

knot 59 fix my

knot 60 fix my

knot 61 fix my

knot 71 fix my

knot (72 75 1) fix my

grup 3

let#nr 50 \$Festhaltung entlang x Achse Federsteifigkeit

knot #nr fix pmy \$Einflussbreite 35 cm

fede #nr #nr dx 1 cm 0.131

let#nr #nr+1

knot #nr fix pmy \$Einflussbreite 50 cm

fede #nr #nr dx 1 cm 0.1879

let#nr #nr+1

knot #nr fix pmy

fede #nr #nr dx 1 cm 0.1879

let#nr #nr+1

knot #nr fix pmy \$Einflussbreite 35 cm

fede #nr #nr dx 1 cm 0.131

let#nr #nr+1

grup 4

knot 1 fix zpmm

knot 3,5 fix mypx \$Festhaltung entlang y Achse

fede 4 ka 10 dz 1 cp 1000000 cq 120000 mue 0.44

fede 2 ka 11 dz 1 cp 1000000 cq 120000 mue 0.44

fede 3 ka 12 dz 1 cp 1000000 cq 120000 mue 0.44 \$Das Seil kann schaukeln 6 cm 1kN

knot 57 fix mxpx

fede 1 ka 57 dz 1 cp 1000000 cq 100000 mue 0.44

knot 66 fix del

ENDE

## Anhang 7

```
-PROG GRAF urs:4
KOPF
SIZE DINA lp M 0 RAND nein FORM stan
SCHR 0.20 0.20 0.18 0.16 FAKB 0.65

STRU KONT
STRU 1 0
STRU 0 1
KNOT TYP fix; und; STRU NRQ 0
QUAD TYP D SCHR 0.18
QUAD TYP KOOR $ Hilfsgrafik fuer Fehlersuche
QUAD TYP B SCHR 0.30
QUAD TYP BT SCHR 0.30
BEOB STAN 3 5 -4 negz; STRU QUER 0 $ incl. Querschnittskonturen
ENDE

+PROG ase urs:5
KOPF lf2
SYST PROB th3 ITER 1500 fmax 3.8 tol 0.0000001
lf 2 egy 0.0 egz 0
$ Eigengew. innen und aussen
last 1,5 pz 0.015625
last 50,58 pz 0.0547 $Eigengew
last 51,59 pz 0.078 $Eigengew
last 52,60 pz 0.078 $Eigengew wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite
last 53,61 pz 0.0625 $Eigengew

$ Eigengew. auf Stab
last 3 pz 0.01875
last 54 pz 0.0656 $Eigengew
last (55 56 1) pz 0.09375 $Eigengew
last 57 pz 0.075

ENDE

+PROG ase urs:6
KOPF lf3
SYST PROB th3 ITER 2000 fmax 0.8 tol 0.000000001 plf 2
lf 3 egy 0.0 egz 0

$Schnee
last 50,58 pz 0.1406 $Schnee
last 51,59 pz 0.15625 $Schnee
last 52,60 pz 0.15625 $Schnee
last 53,61 pz 0.125 $Schnee
lc 2
$Reibungserhöhung
last 57 pz 0.15
$Einflussbreite 0.25m  $Z_s = e_b \cdot t \cdot l_0 \cdot r_g / \mu = 0.25 \cdot 0.02 \cdot 0.44 \cdot 25 / 0.44 = 0.25 \cdot 0.5$ 
last 10 pz 0.35*0.5 $Einflussbreite 0.35m
last 11 pz 0.5*0.5 $Einflussbreite 0.5m
last 12 pz 0.5*0.5 $Einflussbreite 0.5m
last 57 pz 0.35*0.5 $Einflussbreite 0.35m
ENDE
```

## Anhang 7

+PROG ase urs:7

KOPF Kriechen der Folie I

SYST PROB th3 ITER 500 plf 3 fmax 0.6 tol 0.00000001

krie NKRI 10 ro 0.8\$wird mit phis gerechnet so ist ZK = Z0 also ohne Abminderung aufgrund der  
\$Zwangsbeanspruchung

grup 0 phis 0.0

grup 1,2 phis 2

grup 3 phis 2 phif 2

grup 4 phis 0

If 4 egy 0. egz 0

lc 3

ENDE

+PROG ase urs:8

KOPF If14

SYST PROB th3 fmax 0.80 ITER 1020 plf 13 tol 0.000001 \$

If 14 egy 0.0 egz 0

\$Schnee

last 50,58 pz 0.1406 \$Schnee wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite

last 51,59 pz 0.15625 \$Schnee

last 52 pz 0.15625 \$Schnee wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite

last 53 pz 0.125 \$Schnee

lc 2

\$Reibungserhöhung

last 57 pz 0.15 \$Erhöhung aus Einspannwirkung

Last 10 pz 0.35\*0.5 \$Einflussbreite 0.35m  $Zs=eb*t*I0*rg/\mu=0.25*0.02*0.44*25/0.44=0.25*0.5$

last 11 pz 0.5\*0.5 \$Einflussbreite 0.5m

last 12 pz 0.5\*0.5 \$Einflussbreite 0.5m

last 57 pz 0.4\*0.5 \$Einflussbreite 0.34m

ENDE

+PROG ase urs:19

KOPF If15

SYST PROB th3 fmax 0.8 ITER 2000 plf 14 tol 0.0000001 \$

If 15 egy 0.0 egz 0

\$Schnee

last 50,58 pz 0.1406 \$Schnee wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite

last 51 pz 0.15625 \$Schnee

last 52 pz 0.15625 \$Schnee wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite

last 53 pz 0.125 \$Schnee

lc 2

\$Reibungserhöhung

last 57 pz 0.15

Last 10 pz 0.35\*0.5 \$Einflussbreite 0.35m  $Zs=eb*t*I0*rg/\mu=0.25*0.02*0.44*25/0.44=0.25*0.5$

last 11 pz 0.5\*0.5 \$Einflussbreite 0.5m

last 12 pz 0.5\*0.5 \$Einflussbreite 0.5m

last 57 pz 0.35\*0.5 \$Einflussbreite 0.35m

ENDE

## Anhang 7

```
+PROG ase urs:17
KOPF lf16
SYST PROB th3 fmax 0.8 ITER 1000 plf 15 tol 0.000001 $
lf 16 egy 0.0 egz 0
$Schnee
last 50 pz 0.1406 $Schnee wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite
last 51 pz 0.15625 $Schnee
last 52 pz 0.15625 $Schnee wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite
last 53 pz 0.125 $Schnee
last 58 pz 0.08
lc 2
$Reibungserhöhung
last 57 pz 0.15
Last 10 pz 0.35*0.5 $Einflussbreite 0.35m  $Zs=eb*10*rg/\mu = 0.25*0.02*0.44*25/0.44=0.25*0.5$ 
last 11 pz 0.5*0.5 $Einflussbreite 0.5m
last 12 pz 0.5*0.5 $Einflussbreite 0.5m
last 57 pz 0.35*0.5 $Einflussbreite 0.35m
ENDE
```

```
+PROG ase urs:18
KOPF lf17
SYST PROB th3 fmax 0.34 ITER 2000 plf 16 tol 0.0000001 $
lf 17 egy 0.0 egz 0
$Schnee
last 50 pz 0.1406 $Schnee wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite
last 51 pz 0.15625 $Schnee
last 52 pz 0.15625 $Schnee wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite
last 53 pz 0.125 $Schnee
$last 58 pz 0.0
lc 2
$Reibungserhöhung
$last 57 pz 0.15
Last 10 pz 0.35*0.5 $Einflussbreite 0.35m  $Zs=eb*10*rg/\mu = 0.25*0.02*0.44*25/0.44=0.25*0.5$ 
last 11 pz 0.5*0.5 $Einflussbreite 0.5m
last 12 pz 0.5*0.5 $Einflussbreite 0.5m
last 57 pz 0.35*0.5 $Einflussbreite 0.35m
ENDE
```

```
+PROG ase urs:9
KOPF Kriechen der Folie II
SYST PROB th3 ITER 1000 plf 17 fmax 0.38 tol 0.000000001

krie NKRI 50 ro 0.8$wird mit phis gerechnet so ist  $ZK = Z0$  also ohne Abminderung aufgrund der
$Zwangsbeanspruchung
grup 0 phis 0.0 $phi 20.0
grup 1,2,3 phis 9.14 phif 9.14
grup 4 phis 0
lf 18 egy 0.0 egz 0
lc 17
ENDE
```

```
+PROG ase urs:10
KOPF Kriechen der Folie III
SYST PROB th3 ITER 1000 plf 67 fmax 2.8 tol 0.00001

krie NKRI 50 ro 0.8$wird mit phis gerechnet so ist  $ZK = Z0$  also ohne Abminderung aufgrund der
$Zwangsbeanspruchung
```

## Anhang 7

grup 0 phis 0.0 \$phi 20.0  
grup 1,2,3 phis 3.17 phif 3.17  
grup 4 phis 0  
lf 68 egy 0. egz 0  
lc 17  
ENDE

-PROG ase urs:14  
KOPF lf203  
SYST PROB th3 ITER 1500 fmax 0.8 tol 0.00002 plf 2 \$ fmax 0.4  
lf 203 egy 0.0 egz 0

\$Schnee  
last 50,58 pz 0.1406\*2 \$Schnee  
last 51,59 pz 0.15625\*2 \$Schnee  
last 52,60 pz 0.15625\*2 \$Schnee  
last 53,61 pz 0.125\*2 \$Schnee  
lc 2  
\$Reibungserhöhung  
last 57 pz 0.15  
Last 10 pz 0.35\*0.5 \$Einflussbreite 0.35m  $Zs=eb*tl0*rg/\mu = 0.25*0.02*0.44*25/0.44=0.25*0.5$   
last 11 pz 0.5\*0.5 \$Einflussbreite 0.5m  
last 12 pz 0.5\*0.5 \$Einflussbreite 0.5m  
last 57 pz 0.35\*0.5 \$Einflussbreite 0.35m  
ENDE

-PROG ase urs:15  
KOPF Kriechen der Folie I  
SYST PROB th3 ITER 2000 plf 203 fmax 0.8 tol 0.0001  
\$dehn ksv ul  
krie NKRI 10 ro 0.8\$wird mit phis gerechnet so ist ZK = Z0 also ohne Abminderung aufgrund der  
\$Zwangsbeanspruchung  
grup 0 phis 0.0 \$phi 20.0  
grup 1,2 phis 2  
grup 3 phis 2 phif 2  
grup 4 phis 0  
lf 204 egy 0. egz 0  
lc 203  
ENDE

-PROG ase urs:11  
KOPF lf220  
SYST PROB th3 fmax 0.10 ITER 10200 plf 213 tol 0.0001 \$  
lf 214 egy 0.0 egz 0

\$Schnee  
last 50 pz 0.1406\*2 \$Schnee wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite  
last 51 pz 0.15625\*2 \$Schnee  
last 52 pz 0.15625\*2 \$Schnee wenn der Schnee zusammenrutscht 0,5m Einflussbreite  
last 53 pz 0.125\*2 \$Schnee

lc 2  
\$Reibungserhöhung  
\$last 57 pz 0.15  
Last 10 pz 0.35\*0.5 \$Einflussbreite 0.35m  $Zs=eb*tl0*rg/\mu = 0.25*0.02*0.44*25/0.44=0.25*0.5$   
last 11 pz 0.5\*0.5 \$Einflussbreite 0.5m  
last 12 pz 0.5\*0.5 \$Einflussbreite 0.5m  
last 57 pz 0.35\*0.5 \$Einflussbreite 0.35m

## Anhang 7

ENDE

-PROG ase urs:12

KOPF Kriechen der Folie II

SYST PROB th3 ITER 1000 plf 214 fmax 1.0 tol 0.0001

krie NKRI 50 ro 0.8\$wird mit phis gerechnet so ist  $ZK = Z0$  also ohne Abminderung aufgrund der  
\$Zwangsbeanspruchung

grup 0 phis 0.0

grup 1,2,3 phis 9.14 phif 9.14

grup 4 phis 0

lf 215 egy 0. egz 0

lc 214

ENDE

-PROG ase urs:13

KOPF Kriechen der Folie III

SYST PROB th3 ITER 1000 plf 264 fmax 2.8 tol 0.00001

krie NKRI 50 ro 0.8\$wird mit phis gerechnet so ist  $ZK = Z0$  also ohne Abminderung aufgrund der  
\$Zwangsbeanspruchung

grup 0 phis 0.0

grup 1,2,3 phis 3.17 phif 3.17

grup 4 phis 0

lf 265 egy 0. egz 0

lc 214

ENDE

## 5 Ergebnisse der Berechnung und Nachweise

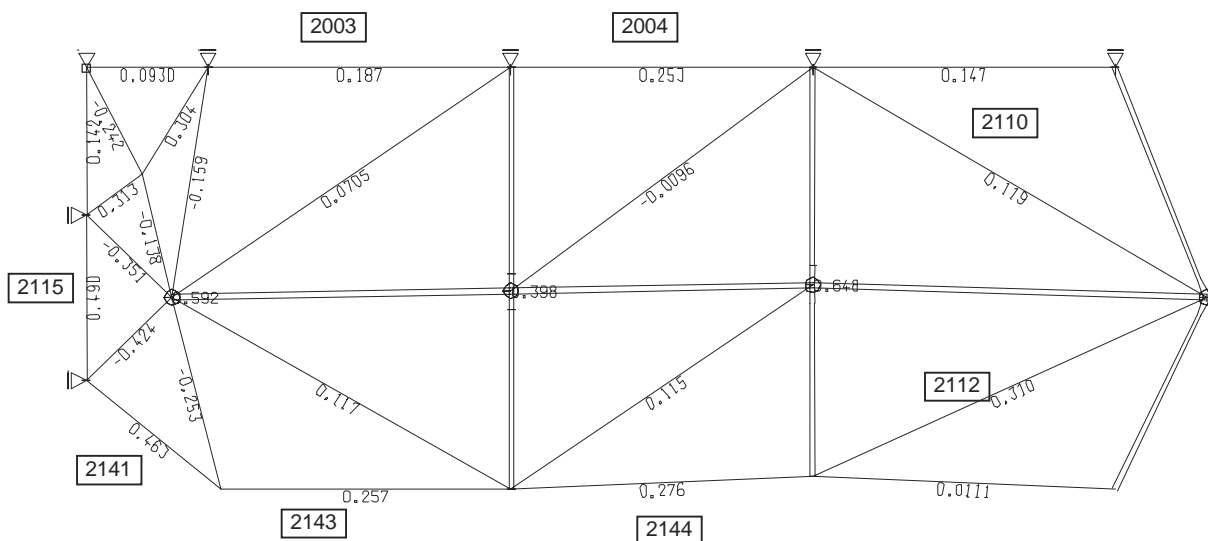
Im folgenden werden die Ergebnisse der Berechnung dargestellt und mit den Erkenntnissen aus den Versuchsergebnissen verglichen.

Die Ergebnisse der Berechnung werden mit dem Programm „Wingraph“ von Sofistik dargestellt. Das Programm stellt Kräfte bei Biegeelementen getrennt von Kräften in Fachwerkstäben dar.

Im Folgenden wird von den Stahlzugstäben gesprochen, wenn von den realen Zugstäben der Glasbogenkonstruktion die Rede ist, auf denen die VSG-Scheibe nach ihrem Versagen zu liegen kommt. Von Zugstäben wird gesprochen, wenn die Rede von Elementen des Stabwerkmodells ist.

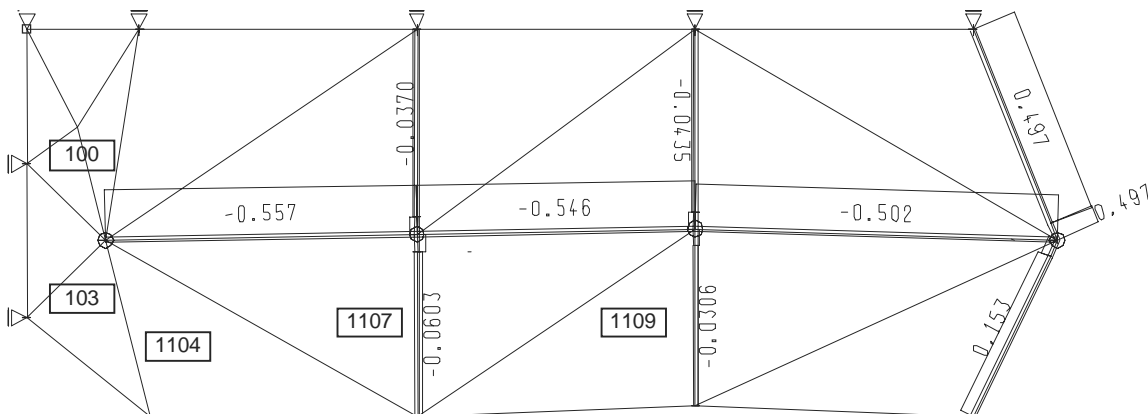
### 5.1 Kräfte, Verschiebungen und Spannungen nach dem Aufbringen der Last

In der Abbildung 5 und 6 werden die Normalkräfte in den Stäben dargestellt.



**Abbildung 5: Normalkräfte in den Fachwerkstäben LF Eigengewicht + Schnee**





**Abbildung 6 Normalkräfte in den Stäben LF Eigengewicht + Schnee**

Durch die räumliche Krümmung der auf den Zugstäben liegenden gebrochenen Scheibe erhalten die Stäbe des Stabzuges 2112-2044-2043-2041-2115 Zugkräfte unter der Belastung des herab hängenden Randes.

Aus der räumlichen Tragwirkung des Stabzuges entstehen in den Stäben 103,1104,1107 und 1109 Druck-Umlenkkräfte.

Im Bereich zwischen den Stahlzugstäben entsteht ein ähnlicher Stabzug 2110-2004-2003 mit geringeren Zugkräften, da der Rand nicht frei hängen kann. Die Asymmetrie führt zu horizontalen Auflagerkräften und geringen Verschiebungen in y-Richtung der Stahlzugstäbe.

Der Stabzug 23-24-25 über dem Stahlzugstab erhält Druckkräfte. Die Biegelemente, welche die Anfangssteifigkeit der Glasscheibe abbilden, erhalten im Randbereich Druckkräfte durch die Umlenkung der am Scheibenrand verlaufenden Kräfte. Zwischen den Stahlzugstäben werden die Umlenkkräfte durch die Auflager aufgenommen.

Die Erkenntnisse aus dem Tragwerksmodell konnten bestätigt werden.

### 5.1.1 Nachweis der Stäbe zu Beginn der Belastung:

Die maximale Zugnormalkraft von  $N = 0,49 \text{ kN}$  tritt im Stab 2115 (Oberseite der Falte in Glasscheibenmitte über dem Stahlzugstab) auf. Da dieser auf der Systemlinie liegt, ist die doppelte Zugkraft anzunehmen. Die Einflussbreite des Stabes oben auf der Welle beträgt ca. 14 cm. Damit ergibt sich eine auf den Folienquerschnitt bezogene Spannung von

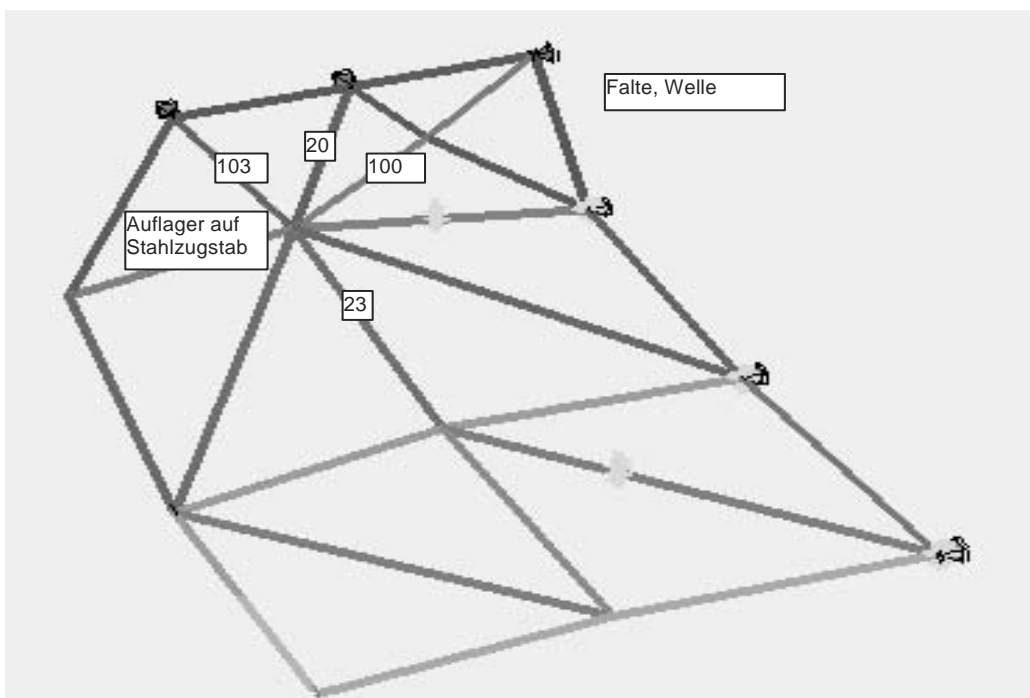
$$\sigma = N/A = 4,6 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 140 \text{ mm} \cdot 1,52 \text{ mm} = 212,8 \text{ mm}^2$$

Wie aus den Versuchen bekannt ist, kann diese Spannung nicht dauerhaft aufgenommen werden. Große Verformungen müssen hier zu einer Umlagerung führen.

Alle weiteren Zuelemente haben eine geringere Zugkraft und eine größere Einflussbreite und sind somit unkritisch.

Die maximalen Druckkräfte von 0,56 kN treten in Stab 23 (über dem Stahlzugstab) auf. Wie schon erwähnt besteht hier keine Knickgefahr.



**Abbildung 7: Bereich der Falte**

Die maximalen diagonalen Druckkräfte in der Welle betragen in Stab 103  $N = -0,42 \text{ kN}$ .

Grundsätzlich können in der Welle, wie in Kapitel 7.2 beschrieben, diagonale Druckkräfte durch zu ihr senkrecht stehende Zugkräfte stabilisiert werden. Diagonale Zugkräfte können den Stab 103 in seiner oberen Hälfte gegen nach außen Knicken teilweise stabilisieren. In seiner unteren Hälfte kann der Stab nach innen knicken. Als Knicklänge wird als Näherung die halbe Stablänge angenommen.

Für Stab 103 ergibt sich somit die Knickkraft:

$$N_{ki} = \left( \frac{\pi}{s_k} \right)^2 * E * I = 3,2 \text{ kN}$$

Knicklänge	$s_k$	$= 0,5 * 24 \text{ cm} = 12 \text{ cm}$
E-Modul nach 0h	$E$	$= 5,1 \text{ kN/cm}^2$

Trägheitsmoment  $I = b \cdot h^3 / 12 = 9,2 \text{ cm}^4$   
 Breite =  $5,4 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm} / 300 \text{ mm} = 0,18 \text{ cm}$   
 Höhe  $h = 8,50 \text{ cm}$   
 Somit kann der Stab die Druckkräfte gut aufnehmen.

### 5.1.2 Kriechen des Stabwerkmodells bis zum Herunterfallen der Schneelast

Nach dem Aufbringen der Last beginnt das Stabwerk zu kriechen. In 10 Schritten (Lastfall 4 bis Lastfall 13) wird das Kriechen berechnet. Im Lastfall 13 ist das Kriechen mit  $\varphi_0 = 2$  soweit fortgeschritten, dass vom Herabfallen der Schneelast am Rand ausgegangen werden muss. Das Tragverhalten der Stäbe ändert sich.

Da die Biegesteifigkeit abgenommen hat, trägt die Scheibe zwischen den Stahlzugstäben mehr als Hängewerk. Es entstehen Zugkräfte in den Biegeelementen. Diese Zugkräfte werden zum einen über Reibung in die Stahlzugstäbe übertragen und zum anderen von Stab 2105 aufgenommen, der vorher noch den Knoten 59 über Zug stabilisiert hatte.

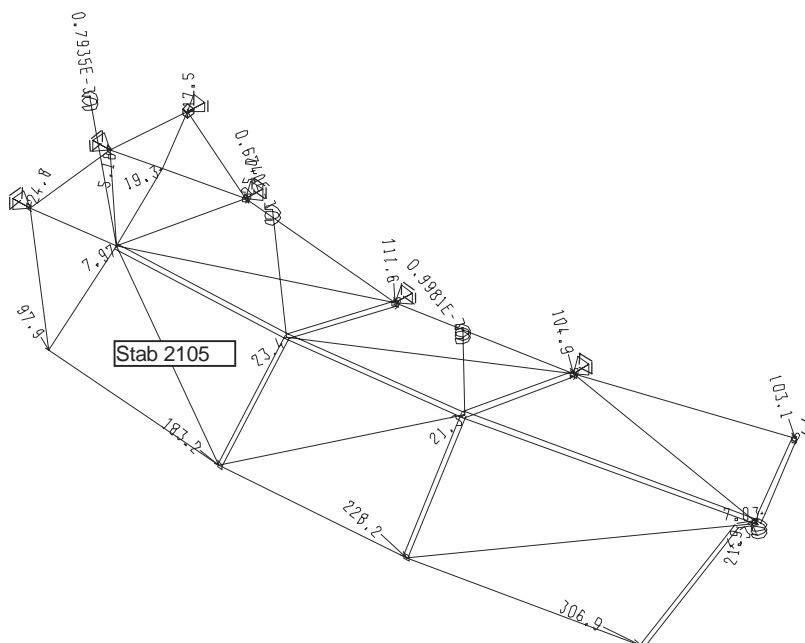


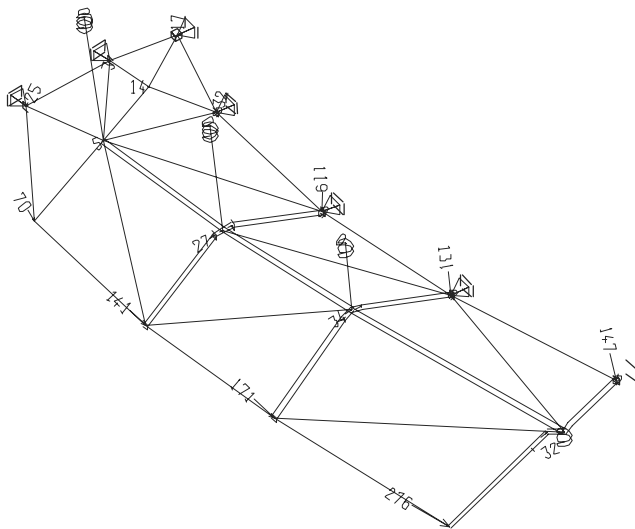
Abbildung 8: Verformung u im LF 13

Dadurch entstehen große Verformungen am Rand der Scheibe und die Lasten fallen herunter. Abb. 8, (LF 13) zeigt die Verformung, bevor die Last herunter gefallen ist.

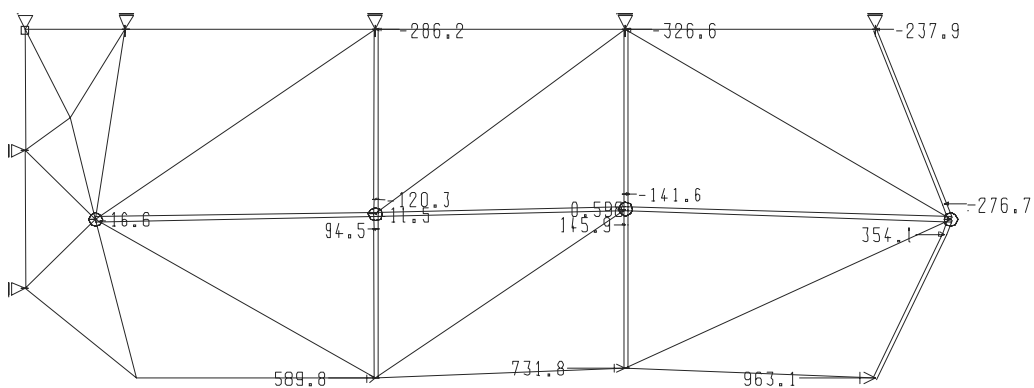
### 5.1.3 Nach dem Herunterfallen der Lasten am Scheibenrand

Die Horizontalverschiebungen über dem gemeinsamen Auflager von Glas und Stahlzugstab sind mit 27 mm deutlich geringer als die vorweggenommene Verschiebung von 60 mm.

Die Knoten über dem Stahlzugstab neigen sich auch nach dem Herunterfallen der äußeren Schneelast um  $0,5^\circ$  nach innen. Die Gefahr, dass die Glasscheibe über die Stahlzugstäbe rutscht, besteht nicht.



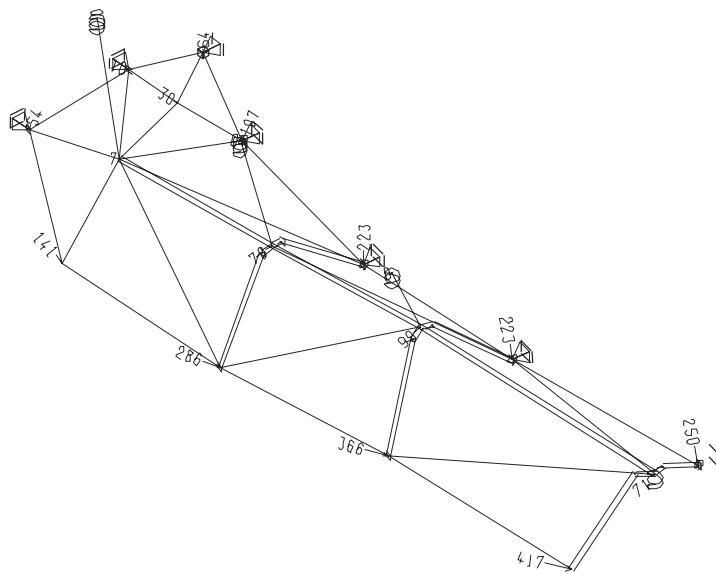
**Abbildung 9: Verformung u nach dem Herunterfallen der äußeren Schneelasten**



**Abbildung 10 Verdrehung um die x-Achse in den Knoten nach dem Herunterfallen der Schneelast**

## 5.2 Verformungen, Kräfte und Spannungen nach 24 h

In Abb.11 ist die Verformung nach 24 h dargestellt. Die Auflager auf den Stahlzugstäben sind geringfügig verschoben. Die vorweggenommene Verformung des gesamten Randes um 60 mm und zusätzlichen 20 mm in Knoten 60 sowie 10 mm in Knoten 61 wurde mit 71 mm knapp erreicht. Von einer Systemänderung aufgrund dieser Verschiebungen ist nicht auszugehen.



**Abbildung 11 Verformungen nach 24 h**

Die Normalkräfte in den Fachwerkstäben werden in Abb. 12 dargestellt. Man erkennt, dass die Zugkräfte im Stabzug am Scheibenrand durch die nach innen (d.h. zwischen die Stahlzugstäbe) ziehenden Kräfte stark abgebaut wurden. Das Herunterhängen des freien Randes wird durch die Biegesteifigkeit der Querstäbe reduziert.

## Anhang 7

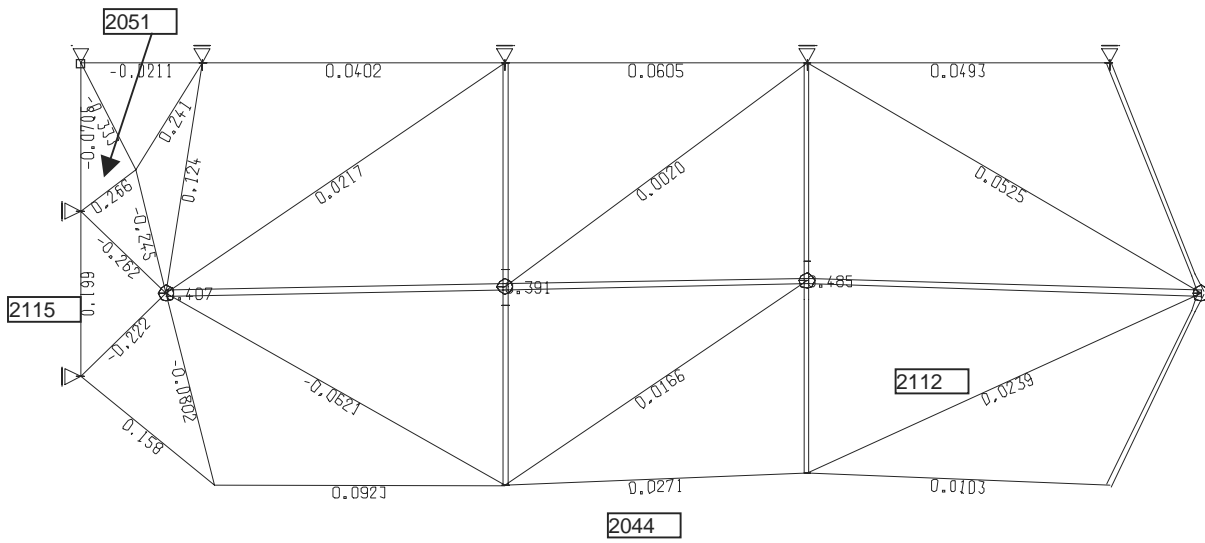


Abbildung 12 Normalkräfte in den Fachwerkstäben nach 24 h

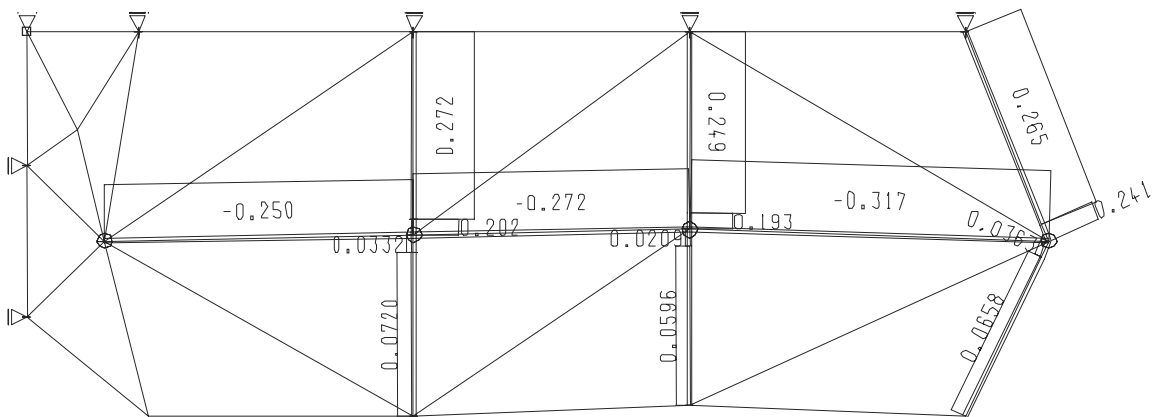


Abbildung 13 Normalkräfte in den Biegestäben nach 24 h

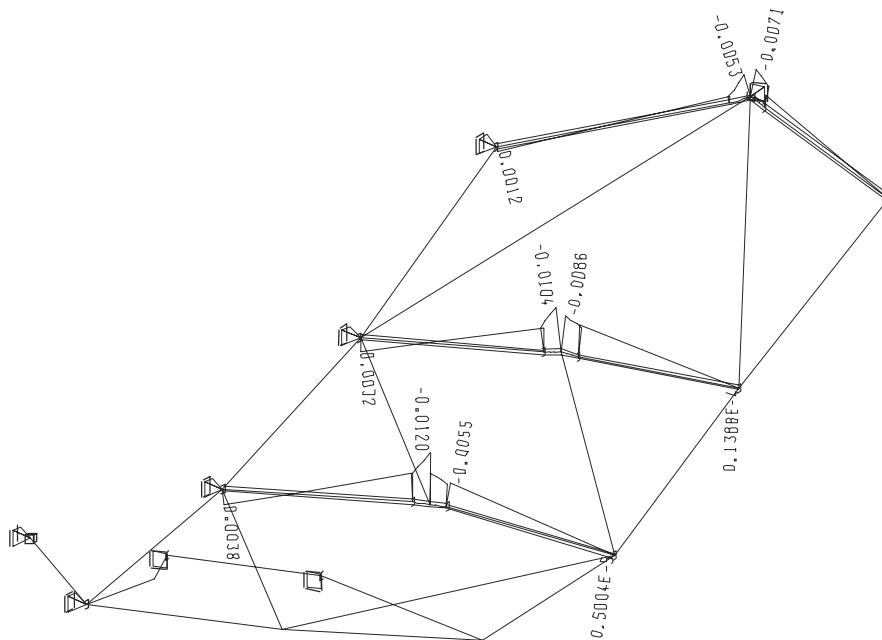


Abbildung 14 Biegemomente my nach 24 h

### 5.2.1 Nachweis der Stäbe und Knoten nach 24 h

#### Spannungen in den Zugstäben:

Die maximale Zugnormalkraft von  $N = 0,266 \text{ kN}$  tritt im Stab 2051 (Diagonale in der Falte zwischen den Stahlzugstäben) auf. Die Einflussbreite des Stabes beträgt ca. 25 cm. Damit ergibt sich eine auf den Folienquerschnitt bezogene Restspannung von

$$\sigma = N/A = 0,7 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 250 \text{ mm} \cdot 1,52 \text{ mm} = 380 \text{ mm}^2$$

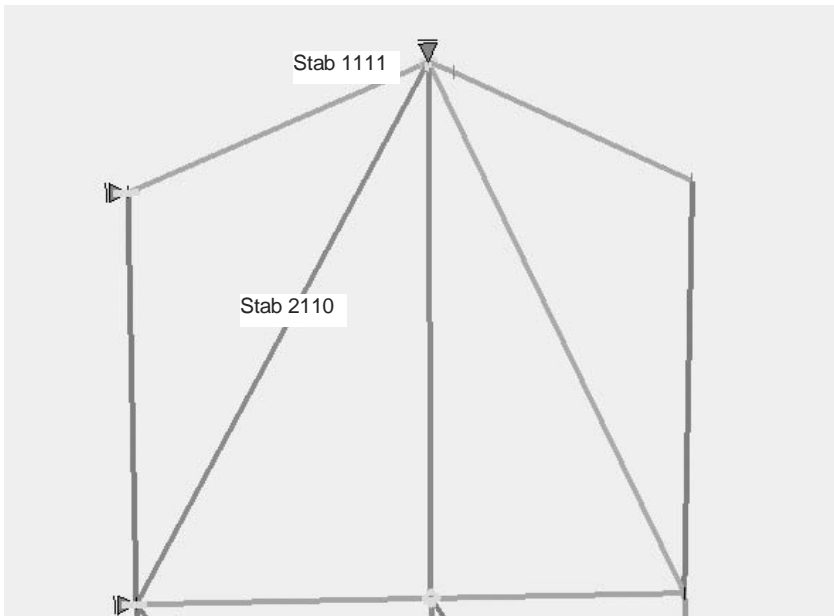
Die Zugkräfte in der Auskragung der Falte über dem Stahlzugstab (Stab 2115) haben sich soweit abgebaut, dass ein Versagen nicht mehr zu erwarten ist:  $N = 0,2 \text{ kN} \cdot 2$

$$\sigma = N/A = 1,88 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 140 \text{ mm} \cdot 1,52 \text{ mm} = 212,8 \text{ mm}^2$$

In beiden Bereichen sind die Zugkräfte deutlich unter den  $2 \text{ N/mm}^2$ .

Da der Fachwerkstab 2110 und der Stab 1111 am gleichen Knoten angreifen und beide Zugkräfte in die Folie eintragen, werden die Kräfte vektoriell addiert und die Zugspannung überprüft.



**Abbildung 15 Draufsicht auf das gemeinsame Auflager von Stahlzugstab und Glasscheibe im Stabwerkmodell**

Als Einflussbreite der Normalkraft werden hier 25 cm angenommen.

Normalkraft Stab 1111: 0,265 kN, Länge in der Ebene: 0,395 m

Diagonalstab 2110: 0,05 kN, Länge in der Ebene: 0,772 m

Vektorielle Addition entsprechend der Ausgangslage:

Kräfte in y-Richtung:  $0,365 / 0,395 * 0,265 \text{ kN} + 0,365 / 0,772 * 0,05 \text{ kN} = 0,268 \text{ kN}$

Kräfte in x-Richtung:  $0,15 / 0,395 * 0,265 \text{ kN} + 0,68 / 0,772 * 0,05 \text{ kN} = 0,144 \text{ kN}$

Resultierende Kraft:  $N = 0,305 \text{ kN}$

Spannung  $N/A = 0,335 \text{ kN} / (25 \text{ cm} * 0,152 \text{ cm}) = 0,8 \text{ N/mm}^2$

Es ist nicht von einem Spannungsversagen auszugehen.

### Druckkräfte:

Durch das Abstützen der Falte auf dem Stahlzugstab entsteht, wie schon in Kapitel 4.2 beschrieben, im Bereich des Auflagers ein Krümmungswechsel im gebrochenen VSG. Dieser Krümmungswechsel liegt etwa in der Mitte von Stab 100 und führt dazu, dass die Falte im Auflagerbereich nicht durch die diagonalen Zugkräfte stabilisiert werden kann.

In Stab 100 treten Druckkräfte von 0,245 kN auf. Um dennoch eine Abschätzung zu treffen, wird hier die Knickkraft für die halbe Stablänge von Stab 100 ermittelt.

$$N_{ki} = \left( \frac{\pi}{s_k} \right)^2 * E * I = 0,32 \text{ kN} \quad \text{Ausnutzung 76\%}$$

Knicklänge  $s_k = 10,9 \text{ cm}$



## Anhang 7

E-Modul nach 24h	E	=0,42 kN/cm <sup>2</sup>
Trägheitsmoment	I = $b \cdot h^3 / 12$	=9,2 cm <sup>4</sup>
Breite=(5,4mm*100mm/300mm)	b	=0,18 cm
Höhe	h=	=8,50 cm

Die Diagonale kann diese Druckkräfte aufnehmen.

Stab 20 hat Druckkräfte von 0,262 kN und eine Länge von 24 cm. Durch seine Krümmung kann der Stab in seiner oberen Hälfte nur nach außen knicken. Die zur Welle gegensinnige Krümmung am Auflager auf dem Stahlzugstab bietet eine Einspannwirkung am Stab gegen das Knicken nach außen. Somit bildet die Knickfigur die zweite Eigenform des Stabes und die Knicklänge beträgt  $l/2$ .

$$N_{ki} = \left( \frac{\pi}{s_k} \right)^2 * E * I = 0,265 \text{ kN} \quad \text{Ausnutzung 99\%}$$

Knicklänge	$s_k$	= 0,5*24 cm = 12 cm
E-Modul nach 0h	E	= 0,42 kN/cm <sup>2</sup>
Trägheitsmoment	I= $b \cdot h^3 / 12$	= 9,20 cm <sup>4</sup>
Breite=(5,4mm*100mm/300mm)	b	= 0,18 cm
Höhe	h	= 8,50 cm

Zur genaueren Überprüfung der Stabilität von Stab 20 wird in den Kapiteln 6-8 dieses Anhangs durchgeführt.

### 5.2.2 Biegung

Der Nachweis der Spannungen in den Stäben:

Das maximale Restmoment in den Biegeelementen quer zu den Stahlzugstäben tritt nach 24 h in Stab 1106 mit  $M_{max} = 0,012 \text{ kNm}$  auf.

Innerer Hebelarm zwischen Glas und Folie	h=	9,26 mm
Zugkraft in der Folie	$F = M_{max} / h =$	1,3 kN
Einflussbreite des Biegestabes 1108 b =	65 cm / 2+50 cm / 2=	57,25 cm
Foliendicke	t =	1,52 mm
Folienquerschnittsfläche	$A_F = b \cdot t =$	870,2 mm <sup>2</sup>
	$\sigma = F / A_F =$	1,5 N/mm <sup>2</sup> .

Eine Spannung von 2,5 N/mm<sup>2</sup>, die zum Versagen führt, wird nicht erreicht.

### 5.2.3 Verformung am Auflager von Glas und Stahlzugstab:

Im Folgenden werden die Verformungen in der gebrochenen VSG-Scheibe am gemeinsamen Auflager von Glas und Stahlzugstab untersucht.

Zur Ermittlung der maximalen Krümmung, wurde ein Knoten in 3,3 cm Entfernung zum Auflager auf dem Stahlzugstab eingeführt. So kann die Krümmung im Bereich des Auflagers abgeschätzt werden.

#### Krümmung auf der Kragarmseite des Auflagers

Die Verschiebung dieses Knotens in z-Richtung ergibt sich nach 24 h zu 5,1 mm. Durch die Rotation um die Glaskörner entsteht eine Dehnung in der Folie.

In Abb. 17 ist die Glasscheibe schematisch mit der Folie dargestellt. Auf dem gemeinsamen Auflager von Glas und Stahlzugstab liegt die Scheibe eben auf und in einem Abstand von 3,3 cm hängt die Scheibe um z herunter.

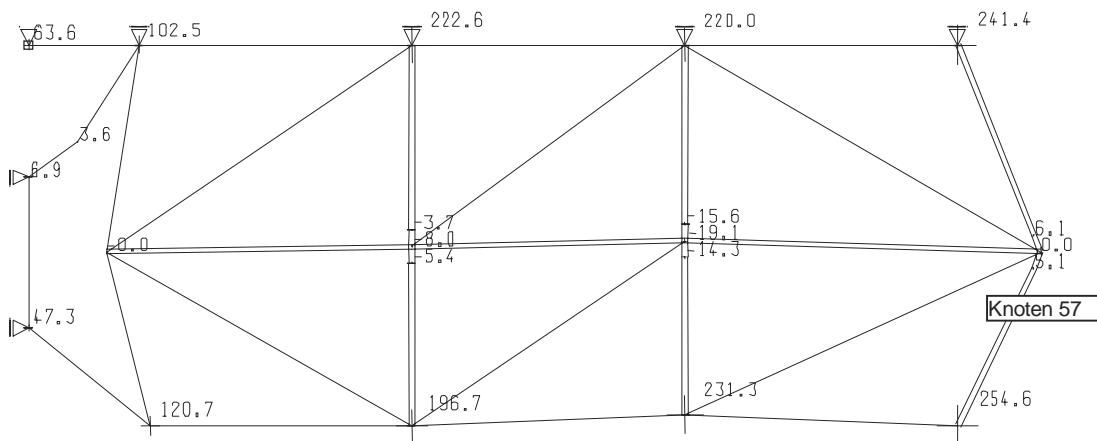


Abbildung 16: Knotenverschiebungen in z Richtung in mm nach 24h

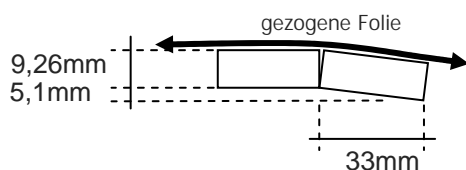


Abbildung 17: Dehnung der Folie am Auflager

Geht man, wie in Abb. 17 dargestellt, von einem Knick aus, so beträgt die Dehnung der Folie:

$$\Delta l = 5,1 \text{ mm} / 33 \text{ mm} * 9,26 \text{ mm} = 1,43 \text{ mm}$$

Bezogen auf die Einflussbreite von 33 mm beträgt damit die Dehnung aus Krümmung:

$$\Delta l / L = 1,43 / 33 = 4,3\%$$

Sie ist damit wesentlich geringer als die gemessene minimale Versagensdehnung von 60%.

### **Innenseite am Glasaufleger Knoten 57**

Auf der Innenseite vom Glas- und Stahlzugstab- Auflager wurde ebenfalls ein Knoten in 3,3 cm Entfernung eingeführt. Die Verschiebungen dieses Knotens in z-Richtung betragen nach 24 h zu 6,1 mm und ergeben damit eine Dehnung von:

$$\varepsilon = 5,2\% \ll 60\%$$

Die Dehnung aus Krümmung ist somit nicht kritisch.

Die Längenänderung des kurzen Stabes kann durch die Verschiebungen des Knotens 57 in y-Richtung relativ zu Knoten 70 errechnet werden.

$$\text{Knoten 57 } u_y = 71,3 \text{ mm}$$

$$\text{Knoten 70 } u_y = 74,4 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \Delta L_n = 3,1 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \Delta L_n / L = 9 \% = \text{unkritisch}$$

## 5.2.4 Vergleich der Berechnungen mit den Versuchsergebnissen

### Verformung

Im folgenden werden die Ergebnisse der Berechnung mit den Ergebnissen des Großversuchs am Glasscheibenrand verglichen. In Abb. 18 wird der Scheibenrand nach 24 h gezeigt und eine Skizze zum Verständnis der Berechnung dargestellt.

Die Vertikalverschiebung  $v$  von Knoten 61 zu Knoten 71 beträgt nach 24 h rechnerisch 320 mm (Verformung + Ausgangshöhendifferenz der Knoten 80 mm). Die Horizontalverschiebung von Knoten 61 im Verhältnis zu Knoten 71 beträgt 226 mm.

Das entspricht einem Winkel zwischen den Knoten von:

$$\alpha = \arcsin(v/l) = 73^\circ$$

Stablänge zwischen Knoten 71 und 61:  $l = 0,335 \text{ m}$

Das gemessene  $\alpha$  beträgt  $70^\circ$

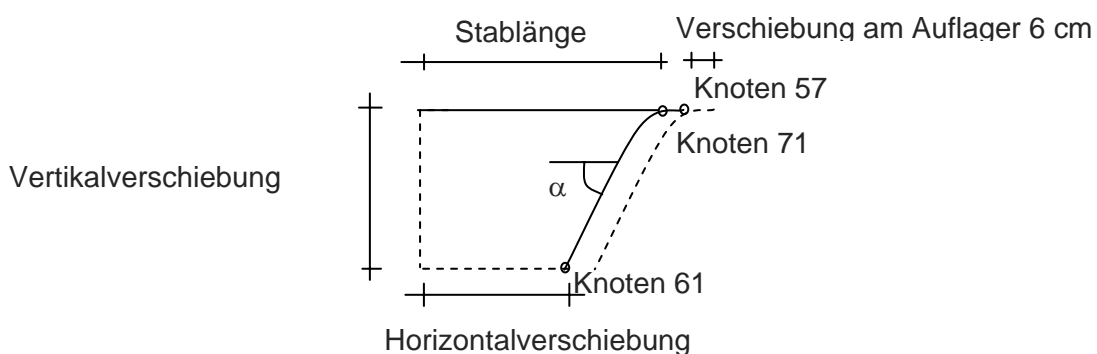
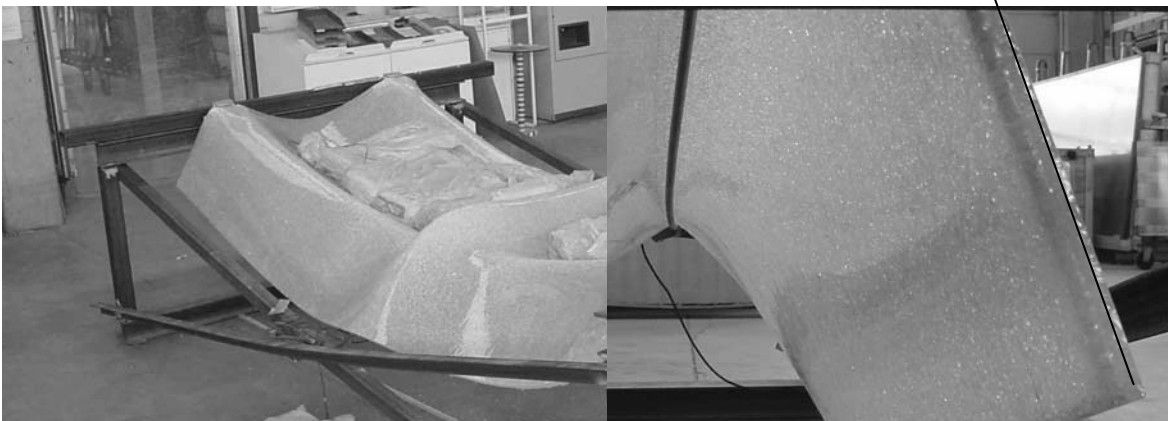
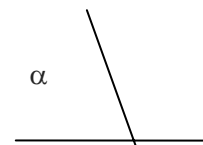


Abbildung 18: Vergleich der Verformungen, im Foto rechts Blick unter die Glasscheibe

### Einreißen:

Die Glasscheibe ist an keiner Stelle eingerissen.

### 5.3 Verformungen, Kräfte und Spannungen nach 48 h

Es werden hier dieselben Stäbe wie bei der Betrachtung nach 24h untersucht.

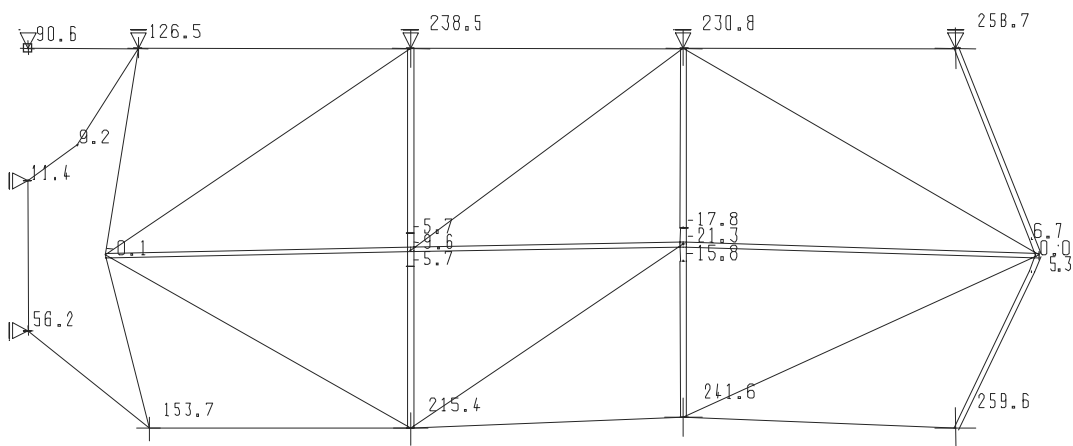


Abbildung 19: Verformungen nach 48 h in z-Richtung

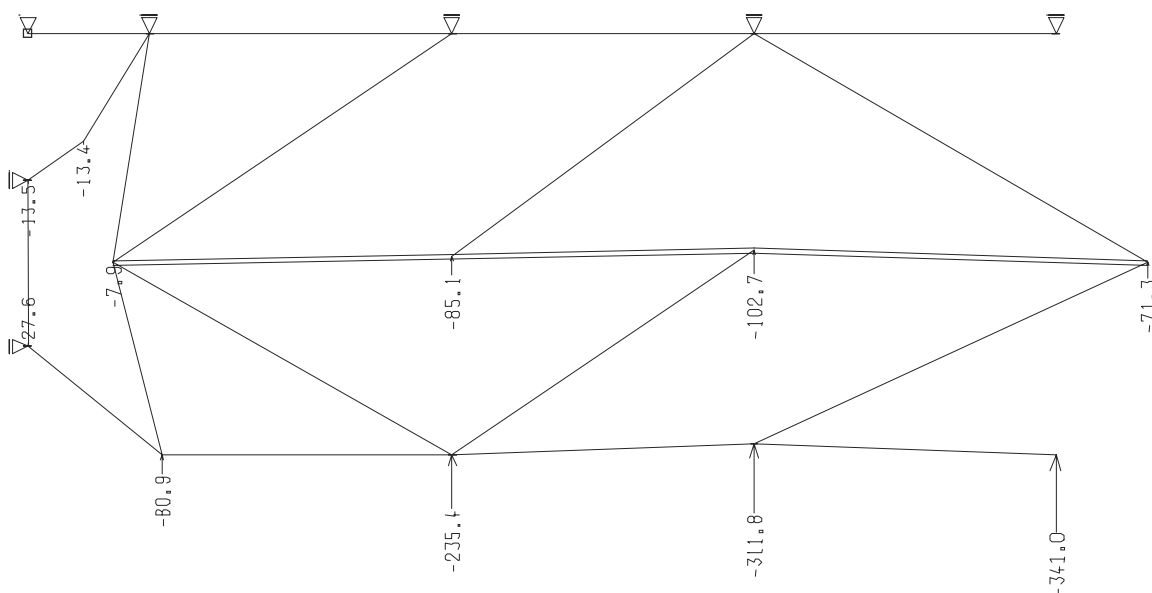


Abbildung 20: Verformungen nach 48 h in y-Richtung

Knicklänge	$s_k$	=10,9 cm
E-Modul nach 48h	E	=0,333 kN/cm <sup>2</sup>
Trägheitsmoment	$I = b \cdot h^3 / 12$	=9,2 cm <sup>4</sup>
Breite=(5,4mm*100mm/300mm)	b	=0,18 cm
Höhe	h=	=8,50 cm
Die Diagonale kann diese Druckkräfte aufnehmen.		

### 5.3.1 Berechnung der Verformung im Glas am Auflager von Glas und Stahlzugstab:

Zur Ermittlung der maximalen Krümmung wurde ein Knoten in 3,3 cm Entfernung zum Auflager auf dem Stahlzugstab eingeführt. So kann die Krümmung im Bereich des Auflagers abgeschätzt werden.

#### Krümmung auf der Kragarmseite des Auflagers

Die Verschiebung dieses Knotens in z-Richtung steigt von 5,1 mm nach 24 h auf 5.3mm nach 48 h. Eine entscheidende Änderung der Dehnung ist nicht vorhanden.

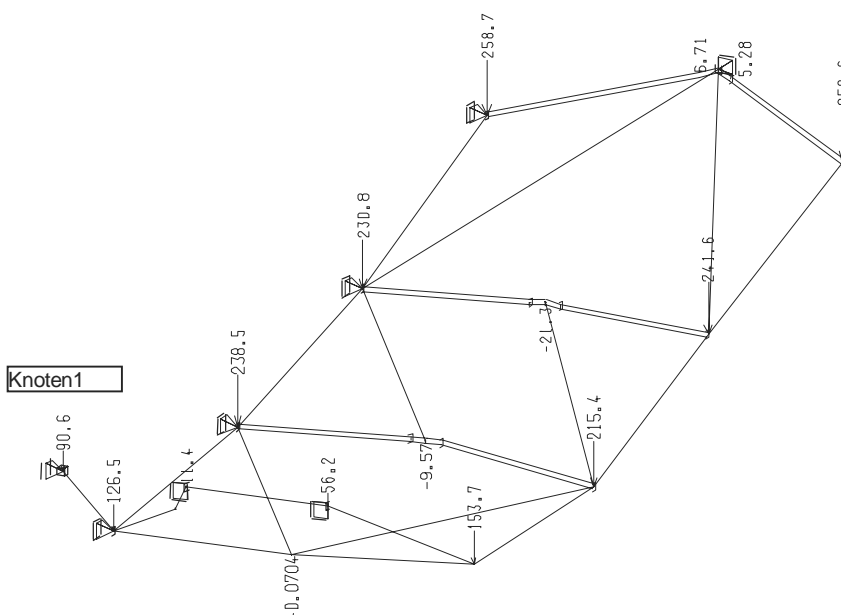
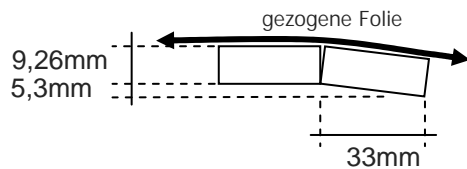


Abbildung 21: Verschiebungen in z-Richtung nach 48 h

Durch die Rotation um die Glaskörner entsteht eine Dehnung in der Folie.

In Abb. 22 ist die Glasscheibe schematisch mit der Folie dargestellt. Auf dem gemeinsamen Auflager von Glas und Stahlzugstab liegt die Scheibe eben auf und in einem Abstand von 3,3 cm hängt die Scheibe um z herunter.



**Abbildung 22: Dehnung der Folie am Auflager**

Geht man, wie in Abb. 22 dargestellt, von einem Knick aus, so beträgt die Dehnung der Folie:

$$\Delta l = 5,3 \text{ mm} / 33 \text{ mm} * 9,26 \text{ mm} = 1,49 \text{ mm}$$

Bezogen auf die Einflussbreite von 33 mm beträgt damit die relative Dehnung aus Krümmung:

$$\Delta l / L = 1,49 / 33 = 4,5\%$$

Sie ist damit ebenfalls wesentlich geringer als die gemessene minimale Versagensdehnung von 60%.

### **Innenseite am Glasaufleger Knoten 57**

Auf der Innenseite vom Glas- und Stahlzugstab-Auflager wurde ebenfalls ein Knoten in 3,3 cm Entfernung eingeführt. Die Verschiebungen dieses Knotens in z-Richtung ergeben sich nach 24 h zu 6,1 mm und nach 48h zu 6,7 mm und ergeben damit eine Dehnung von:

$$\varepsilon = 5,7\% \ll 60\%$$

Die Dehnung aus Krümmung ist somit nicht kritisch.

Die Längenänderung des kurzen Stabes kann durch die Verschiebungen des Knotens 57 in y-Richtung relativ zu Knoten 70 errechnet werden.

$$\text{Knoten 57 } u_y = 71,3 \text{ mm}$$

$$\text{Knoten 70 } u_y = 75,3 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \Delta L_n = 4,0 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \Delta L_n / L = 12 \% \text{ unkritisch}$$

### **5.3.2 Verformung des Gesamtsystems**

Wie in Abbildung 21 zu erkennen ist verschiebt sich der Knoten 1 zwischen den Stahlzugstäben um 9 cm nach unten. Da in dem oberen Stab der Falte Druckkräfte herrschen, entstehen hier im Verlauf der Berechnung zunehmend Abtriebskräfte, die bei weiterer Kriechberechnung zum Kollaps der Falte führen. Durch das Knicken der Druckstäbe wird der Kollaps der Falte beschleunigt.

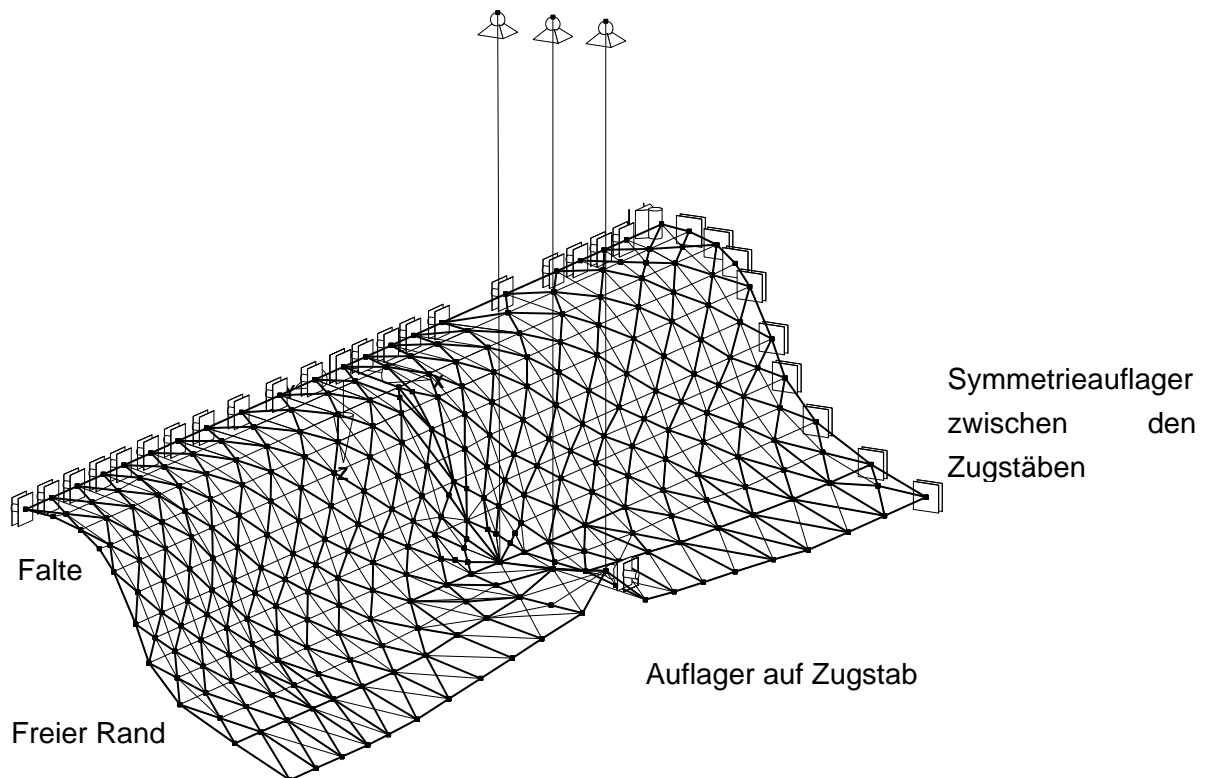
Ob es nach dem Kollaps der Falte noch eine weitere Resttragfähigkeit gibt, wurde nicht untersucht.



## 6 Stabwerk zur Untersuchung der Drucktragfähigkeit der Falte

Um die Drucktragfähigkeit im Bereich des Auflagers näher zu untersuchen, wurde die Falte zwischen den Stahlzugstäben abschnittsweise als Stabtragwerk mit einer durchschnittlichen Einzelstablänge von 33 mm abgebildet (Abb. 23). Auf dieses wurden die Belastungen aus dem groben Stabwerk aufgebracht.

Das Auflager der Falte auf dem Stahlzugstab ist in Abb. 23 in der Mitte. Die Lagerung auf dem Zugstab ist in x-Richtung unverschieblich, in Faltenrichtung kann sich die Scheibe durch die Aufhängung an Pendelstäben bewegen. Die Länge der Pendelstäbe ist so gewählt, dass sie dem Durchhang der Zugstäbe unter der Glaslast entsprechen.



**Abbildung 23: Stabtragwerk zur Abbildung der Falte**

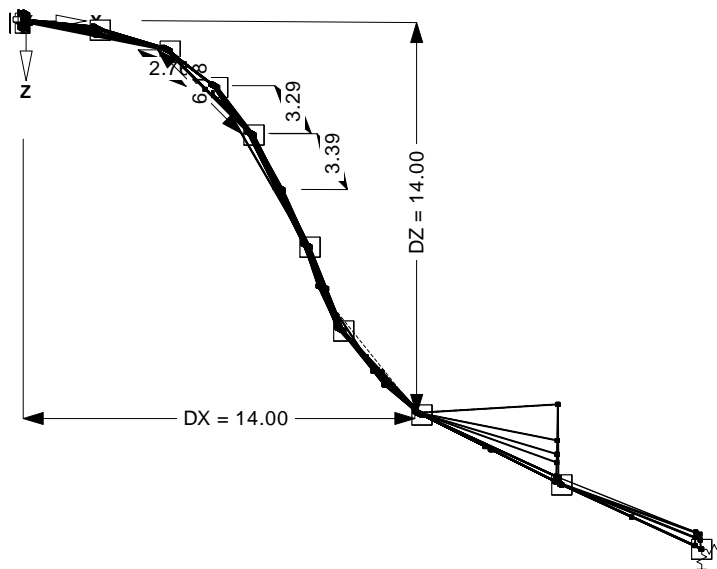
An den Symmetrieachsen sind die Stäbe eingespannt und in z-Richtung verschieblich gelagert. Entlang der Oberkante der Falte sind die Auflager in ,Wellen-Richtung' unverschieblich, entlang der Symmetrielinie zwischen den Zugstäben ist die Lagerung senkrecht zur Wellenrichtung unverschieblich.

Der Rand der Falte, der keine Symmetrieachse darstellt, wurde nicht gelagert. Stabilisierende Einflüsse der Hängebereiche auf das Tragverhalten der Falte werden bei diesem Modell somit nicht erfasst.

## 6.1 Geometrie

Als Geometrie wurde eine Halbwelle mit einer Höhe und Breite von 14 cm über 10 Zwischenknoten entlang der Welle gebildet. Am Fußpunkt der Welle endet die auf dem Stahlzugstab mit einem Winkel von 50° sonst läuft sie weiter aus.

Die Breite der Welle beträgt auf der Innenseite 50 cm bis zur Symmetrielinie und auf der Außenseite 37,5 cm.



## 6.2 Material/Querschnitte

Das Stabwerk wurde so ausgeführt, dass die Knoten mit biegesteifen Stäben verbunden sind, welche die Steifigkeit des gebrochenen VSG nach 24h bzw. 48h aufweisen. Um die richtige Drucksteifigkeit zu erhalten, wurden dort wo Druckkräfte auftreten, zusätzlich zu den Biegestäben Druckstäbe eingeführt.

### 6.2.1 Druckstäbe:

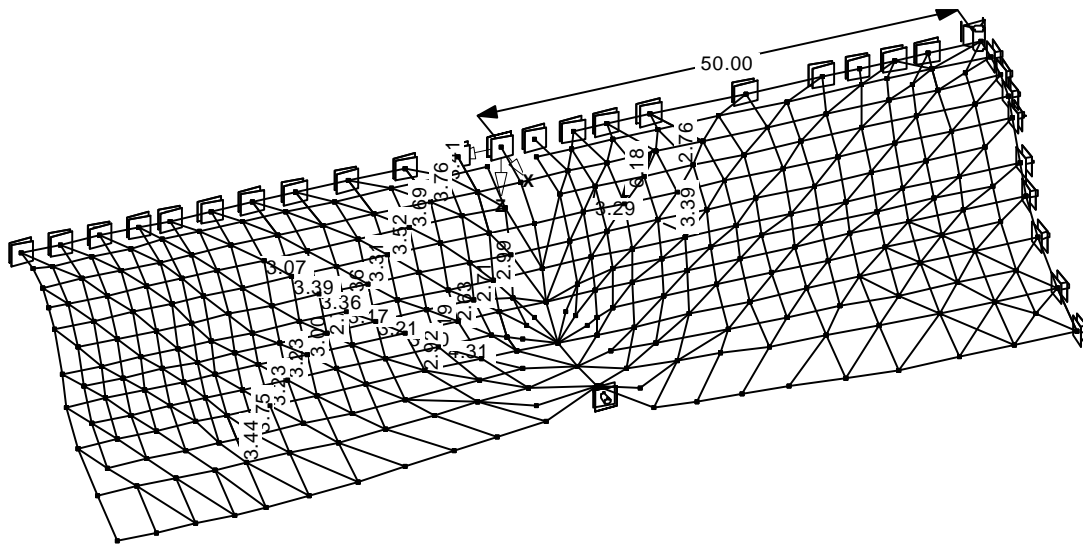
Fläche des Ersatzstabes,  $b = h = 1 \text{ cm}$ ,  $A = 1 \text{ cm}^2$ ,  $E_{\text{Glas}} = 70000 \text{ N/mm}^2$

Durch die Höhe des E-Moduls spielt die Breite des Stabes nahezu keine Rolle mehr.

Die Knicklast eines Einzelstabes mit einer Länge von 33mm kann mit dem E-Modul des gebrochenen VSG ermittelt werden.

$$N_{ki} = \left( \frac{\pi}{s_k} \right)^2 * E * I = 1,14 \text{ kN}$$

Knicklänge	$s_k$	= 3,33 cm
E-Modul nach 24h	E	= 0,42 kN/cm <sup>2</sup>
Trägheitsmoment	$I = b * h^3 / 12$	= 3 cm <sup>4</sup>
Breite $b = 5,4 \text{ mm} * 33 \text{ mm} / 300 \text{ mm}$	b	= 0,0594 cm
Höhe	h	= 8,50 cm



**Abbildung 24: Druckstäbe im Stabtragwerk**

Ein Knicken eines Einzelstabes ist bei der Knickkraft von 1,14 kN nicht zu erwarten.

### 6.2.2 Biegestäbe

Der in den Biegeversuchen gefundene Ersatzquerschnitt von 5,4 x 85 mm für eine Scheibe mit einer Breite von 300 mm eignet sich nicht für ein feines Stabtragwerk, in dem die Einzelstäbe nur eine Einflussbreite von 33 mm haben. Der entsprechende Ersatzquerschnitt hätte nur eine Breite von 0,594 mm und neigt dazu in der Scheibenebene zu versagen. Ein Versagen in Scheibenebene ist in der Realität nicht möglich.

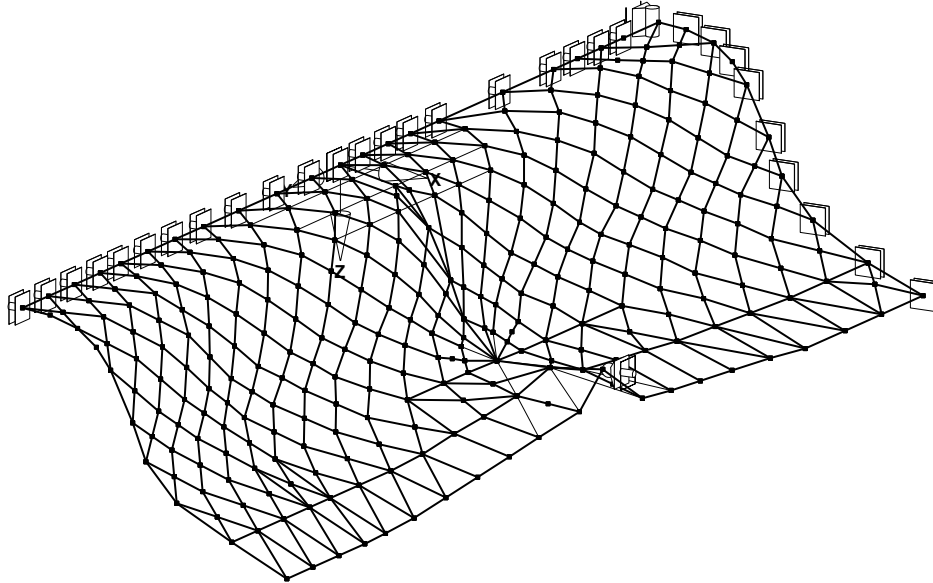
Aus diesem Grund wurde zur Berechnung die Querschnittsbreite so erhöht und der E-Modul verringert, dass die Breite der Ersatzstäbe der doppelten Einflussbreite der Stäbe entspricht. Die Stäbe wurden immer in die Ebene der Falte gedreht.

Ersatzquerschnitt der Biegestäbe:

Breite B = 66mm Höhe H = 85 mm

$E = 0,42 \text{ kN/cm}^2 * 5,4 \text{ mm} / 300 \text{ mm} / 2 = 0,00378 \text{ kN/cm}^2$

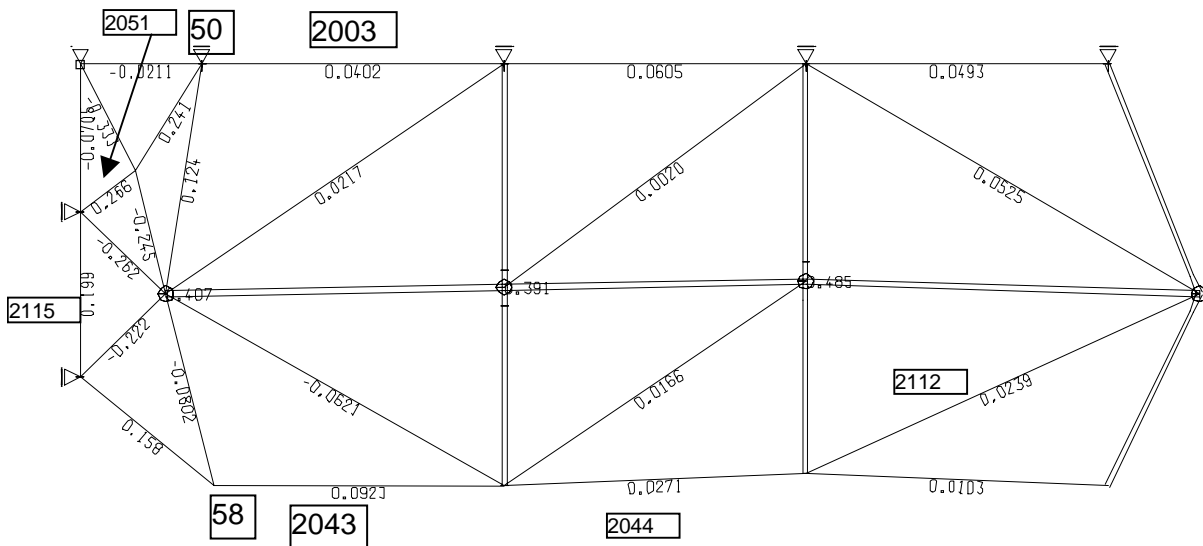
In Abb. 26 sind ebenfalls grüne Fachwerkstäbe zu erkennen diese haben dieselbe Steifigkeit wie die Biegeelemente. Die Ausbildung als Fachwerk erfolgt um nicht Steifigkeiten auszubilden, die schon durch die Biegeelemente abgebildet wurden.



**Abbildung 25 Stäbe mit der Steifigkeit des gebrochenen VSG**

### 6.3 Belastung aus dem Gesamt-Stabwerkmodell nach 24 h

Die Schnittkräfte aus dem Gesamtmodell am Rand des Ausschnittsmodells wurden aus der Berechnung des Gesamtmodells wie in Abb. 26 dargestellt entnommen und angesetzt



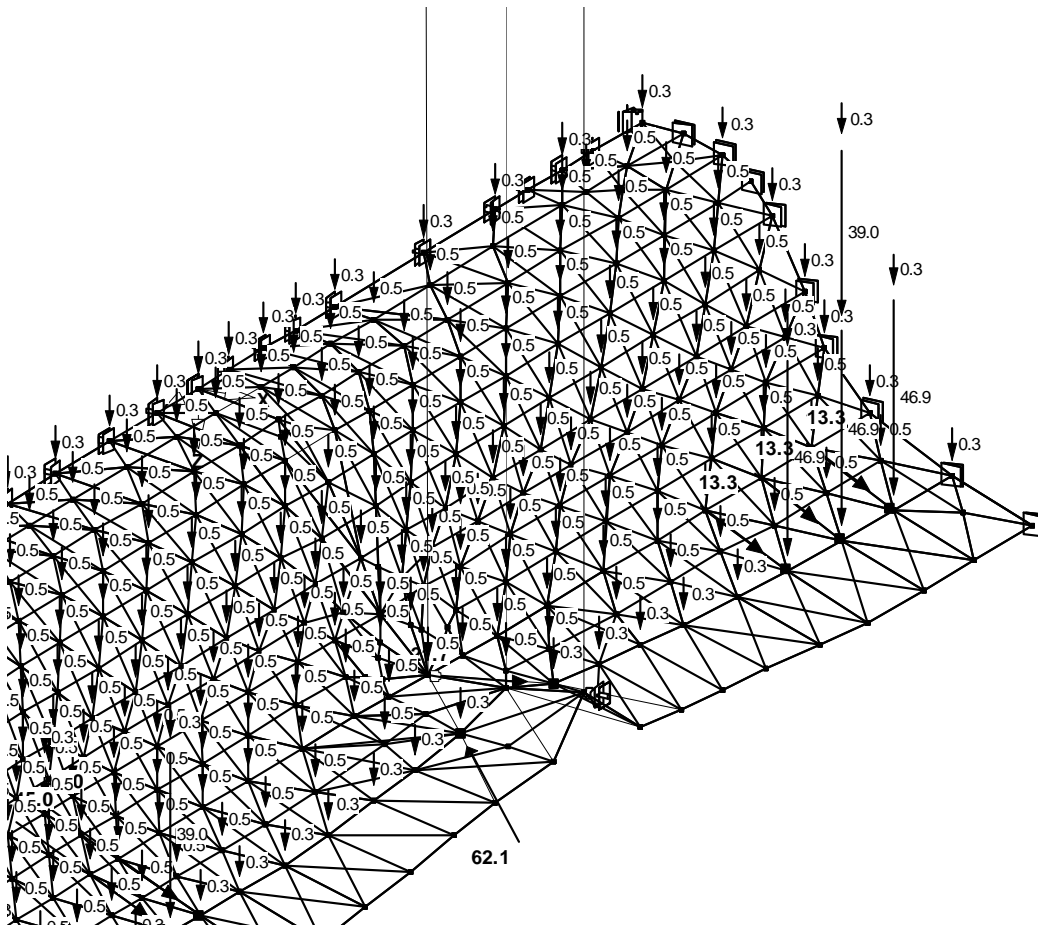
**Abbildung 26: Normalkräfte in den Fachwerkstäben nach 24 h**

Das Eigengewicht des Glases in der Falte wurde in Form von Knotenlasten aufgebracht. Belastung eines Knotens beträgt  $3,3 \text{ cm} \times 3,3 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 25 \text{ kN/m}^3 = 0,5445 \text{ N}$ . Die Randknoten erhalten die halbe Last.

Das Eigengewicht von 0,039 kN aus den an die Falte anschließenden Bereichen (Stab 2003 und Stab 2043) die nicht mehr mit der Falte abgebildet sind und auf Knoten 50 und 58 wirken wird in Form von Knotenlasten aufgebracht.

Die verbleibende Schneelast im Knoten 50 des groben Modells von 0,1406 kN wird ebenfalls auf das verfeinerte Modell aufgebracht.

Die Belastung aus dem Stabwerksmodell wurde auf das verfeinerte Modell übertragen und auf mehrere Knoten aufgeteilt.



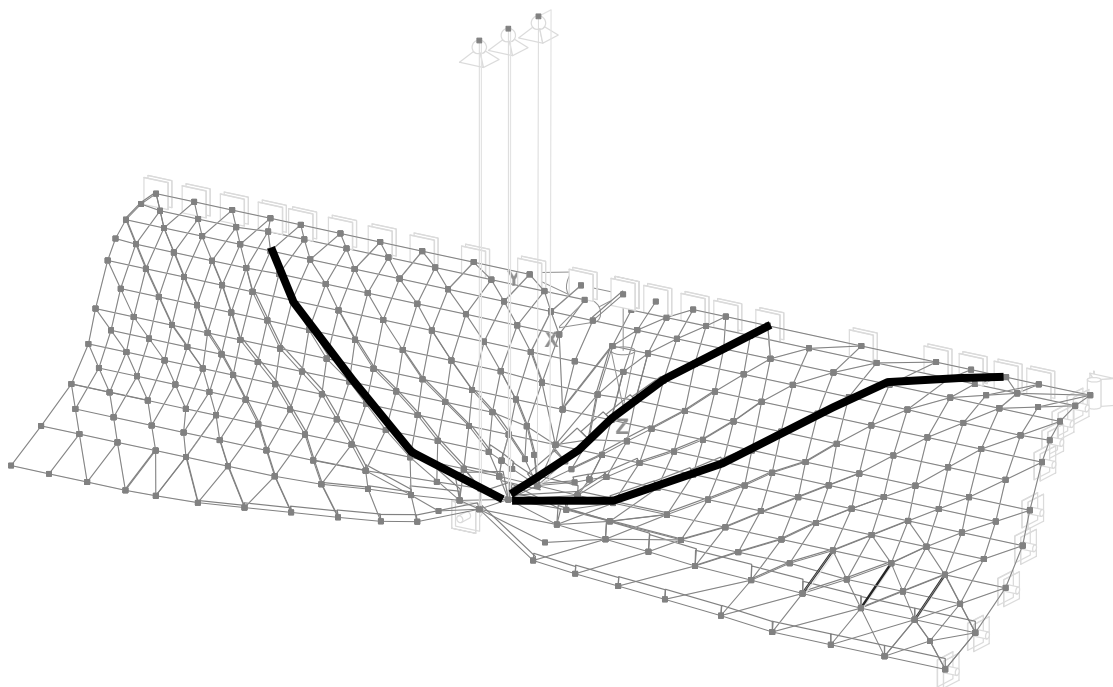
**Abbildung 27 Belastung auf das Stabtragwerk**

Die unterste Elementreihe wurde nicht belastet um die Stabilisierung durch die Hängebereiche abzubilden.

## 6.4 Ergebnis der Berechnung

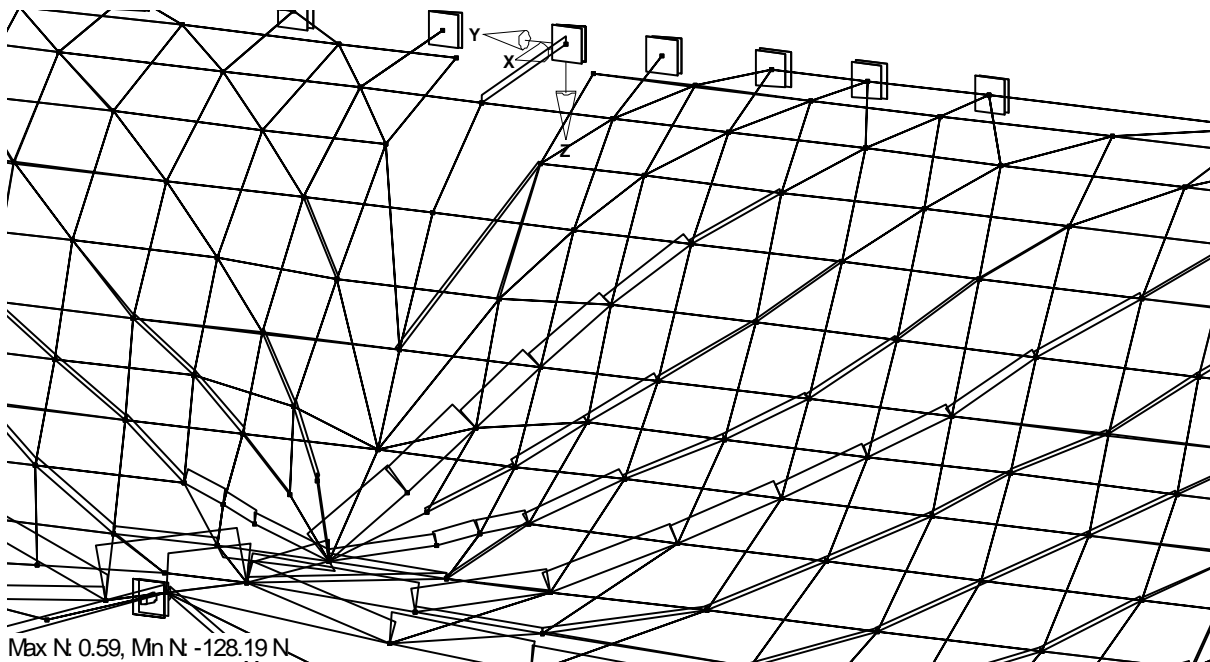
Berechnung nach Theorie erster Ordnung:

Bei der Belastung der Falte, die aus der Hängetragswirkung in der VSG-Scheibe zwischen den Stahlzugstäben entsteht, stellt sich ein Kraftverlauf wie in Abb. 28 dargestellt ein. In Abb. 28 sind zwei Haupt- Drucklastpfade zu erkennen. Die Druck- und Zug- Lastpfade werden, da sie unabhängig von vorgegebenen Stabrichtungen sind, in der gebrochenen VSG-Scheibe optimiert verlaufen.



**Abbildung 28: Hauptlastpfade in der Falte**

Entlang der Lastpfade ist eine Belastungszunahme zum Auflager hin zu erkennen.



**Abbildung 29: Lastzunahme entlang des Lastpfades**

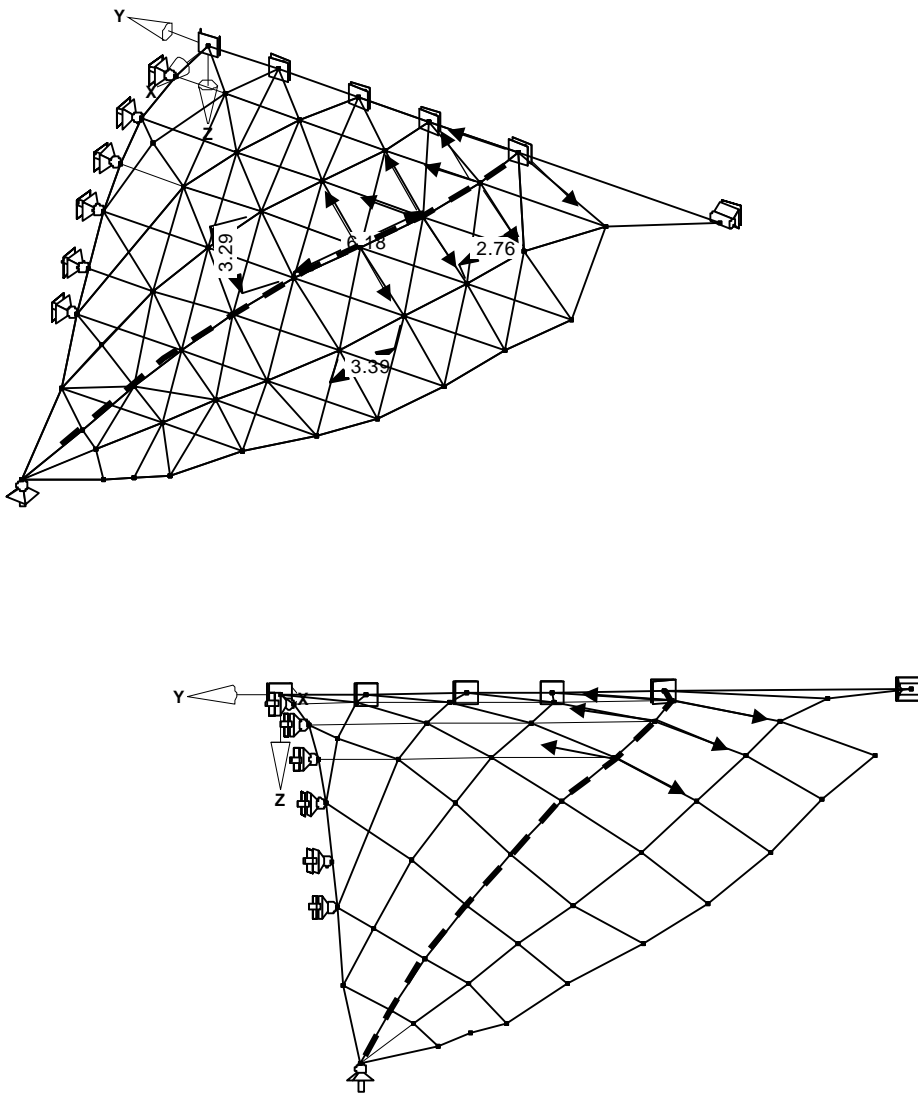
Aufgrund der geringen Steifigkeit der Folie nach 24 h Kriechzeit konnte die Berechnung nicht nach Th. 2. Ordnung durchgeführt werden, da an einigen Knoten am unteren freien Rand die kritische Gesamtlast überschritten wird.

Auch bei einer Berechnung nach der Finite Elemente-Methode, die hier nicht dargestellt wird, stellen sich durch die starken Verformungen und die flachen Winkel der Stäbe zueinander singuläre Stellen ein.

Aus diesem Grund wurde der schon vorher für das Gesamttragwerk eingeschlagene Weg der starken Vereinfachung des Tragwerkes hier weiter beschritten.

Der dargestellte Kraftverlauf im steilen Drucklastpfad (siehe Abb. 30 fett dargestellt), ist auch im Sofistik Modell vorhanden (Stab 20). Dieser wurde näher auf seine Tragfähigkeit untersucht.





**Abbildung 30 Oberer Drucklastpfad im Stabtragwerk in der Falte und Zugkräfte, durch deren Umlenkung die Druckkräfte entstehen**

Wie aus Abb. 26 zu erkennen ist beträgt die berechnete Normalkraft- Beanspruchung im Stab 20 nach 24h 0,262 kN.

Seine Beanspruchung erhält der Drucklastpfad wie in Abb. 30 schematisch dargestellt ist, über die Umlenkung der diagonalen Zugkräfte. Die volle Druckkraft im Pfad baut sich somit erst in dessen Verlauf auf.

Ein Knicken des Drucklastpfades nach außen ist im oberen Bereich nicht möglich, da der Stab, durch die Umlenkung der Zugkräfte nach innen gedrückt wird. Ein Knicken nach innen wird durch die Krümmung des Drucklastpfades verhindert.

Eine Knickgefahr besteht im unteren Bereich des Drucklastpfades der Falte. Die diagonalen Zugkräfte, die senkrecht zu den diagonalen Druckkräften verlaufen, sind hier kleiner als die Druckkräfte und können diese somit nicht stabilisieren.

## 7 Genauere Berechnung des Stabes 20, Belastungsdauer 24 h

Zur Untersuchung des Ausknickens im unteren Bereich des Drucklastpfades wurde eine Last auf den unten dargestellten Stabzug aufgebracht.

Der Drucklastpfad wird anhand von einer Folge von Biege- und Druckelementen, welche die gekrümmte Form beschreiben, als schräger Schnitt durch die Falte abgebildet.

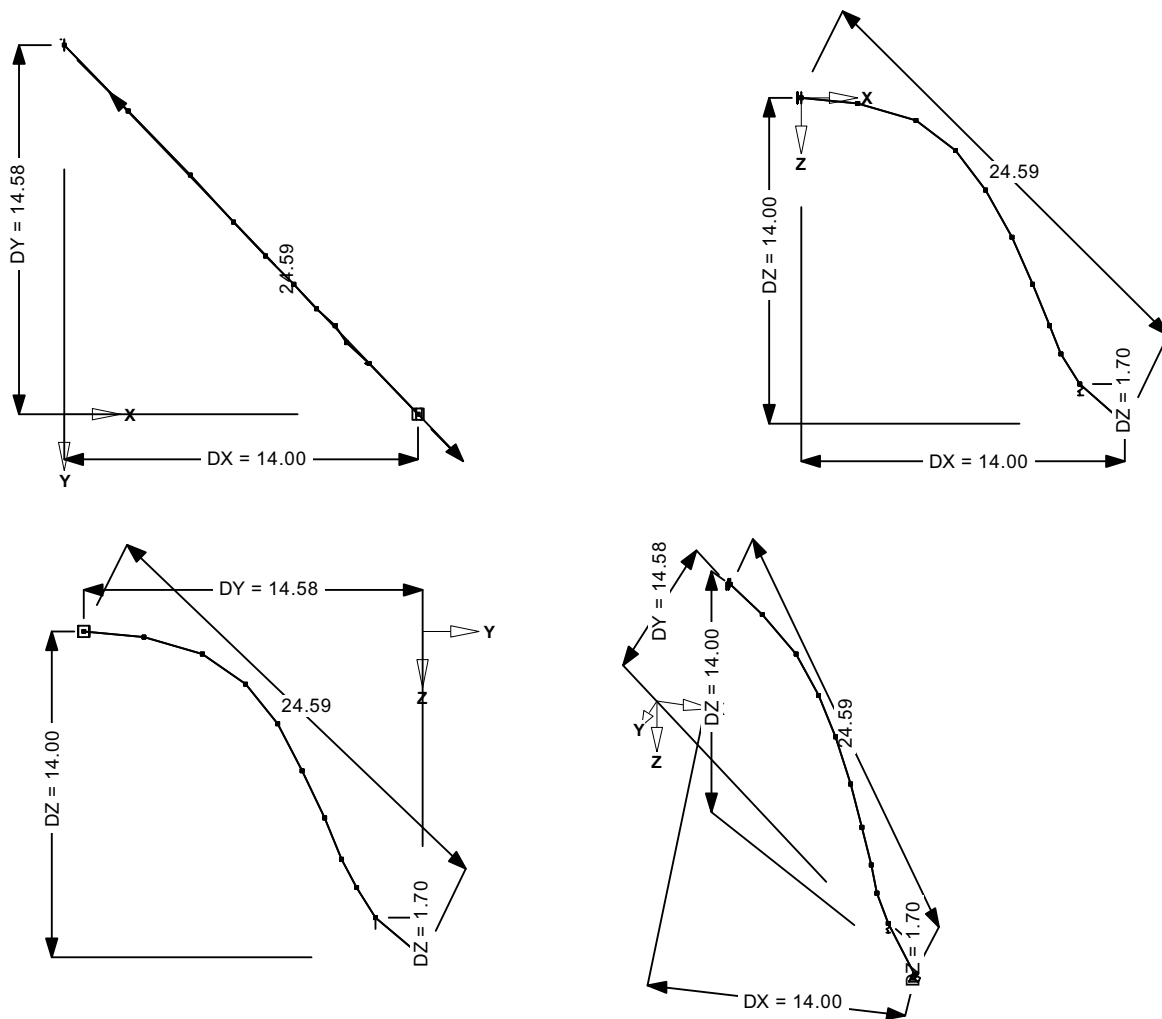


Abbildung 31 Geometrie des untersuchten Stabes

Die zur Welle gegensinnige Krümmung am Auflager auf dem Stahlzugstab bewirkt am Stab eine Einspannwirkung gegen das Knicken nach oben.

Da das Glas aufgefaltet wurde, ist am Auflagerpunkt auf dem Stahlzugstab keine Einspannwirkung gegen das Knicken nach unten vorhanden. Ein Knicken des vorletzten Knotens nach unten ist dadurch begrenzt, dass die Glasscheibe bei einem Ausweichen nach unten noch auf dem Zugstab aufliegen kann.

Um dies zu simulieren, wurde der vorletzte Knoten so elastisch in z-Richtung gelagert dass er unter Vollast und Berechnung Theorie 2. Ordnung nicht tiefer als der unterste Knoten liegt.

## **7.1 Material und Querschnitte**

Die Verbindung der einzelnen Knotenpunkte des Stabzuges erfolgt über jeweils zwei Stäbe. Ein Stab besitzt die Biegesteifigkeit des gebrochenen Glases, der andere ist ein reiner Druckstab mit der Steifigkeit von Glas. So treten im Modell nur die in Realität vorhandenen geringen Normalkraftdehnungen auf.

### **7.1.1 Material**

Damit der Stab in der Ebene der Falte nicht ausweichen kann, wurde er begradigt. Die Querschnittsbreite wurde bei gleichzeitiger Abminderung des E-Moduls verdoppelt.

(siehe Abb. 32)

Der E-Modul aus den Versuchen wurde so angepasst, dass der zu berechnende Einzelstab die doppelte Breite seiner Einflussbreite aufweisen kann.

$$E = 0,42 \text{ kN/cm}^2 \cdot 5,4\text{mm}/300\text{mm}/2 = 0,00378 \text{ kN/cm}^2$$

Für die Druckstäbe wurde der E-Modul von Glas angenommen.

$$\text{Druckstäbe } E = 7000 \text{ kN/cm}^2$$

### **7.1.2 Querschnitte**

#### **Biegestäbe**

Die Biegesteifigkeit des gebrochenen Glases wurde den Zugversuchen entnommen.

Rechteck: Höhe  $h = 85 \text{ mm}$ , doppelte Einflussbreite  $b = 200 \text{ mm}$

#### **Druckstäbe**

Rechteck  $h = 10 \text{ mm}$   $b = 10 \text{ mm}$



Abbildung 32: Rendering der Biegestäbe, die das gebrochene VSG abbilden

## 7.2 Belastung

Wie schon festgestellt wurde, ist der untere Bereich der Falte knickgefährdet. Der obere Bereich behält im Großen und Ganzen seine Form. Um die Belastung auf den Stab entsprechend dem Lasteintrag in der Falte anzusetzen, wurde die Belastung auf den Stab im ersten Schritt als Vertikallast aufgebracht.

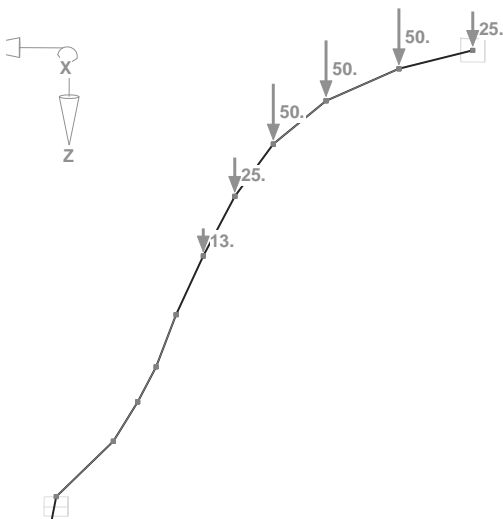
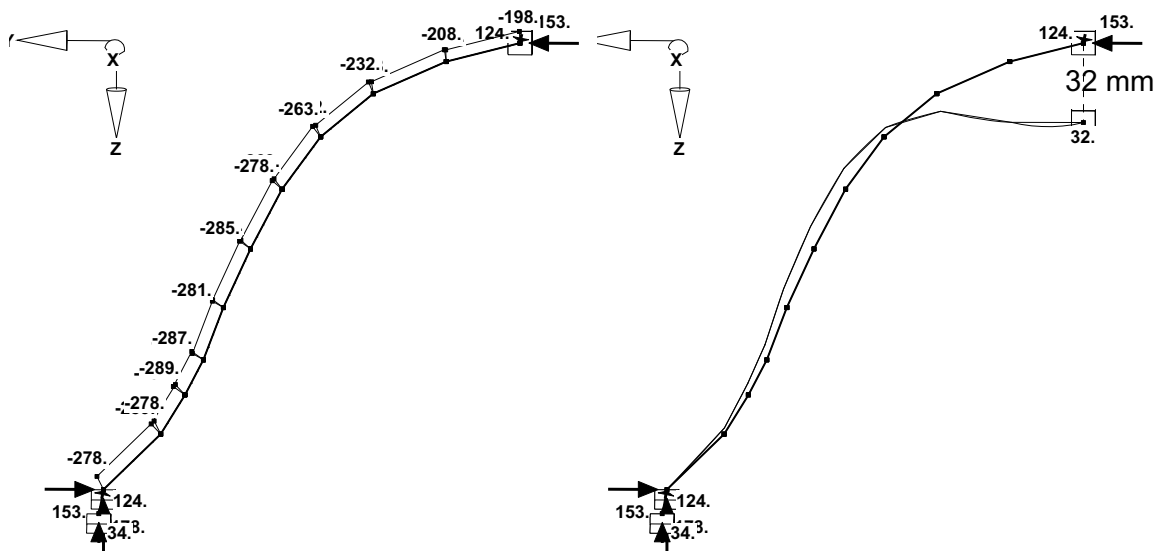


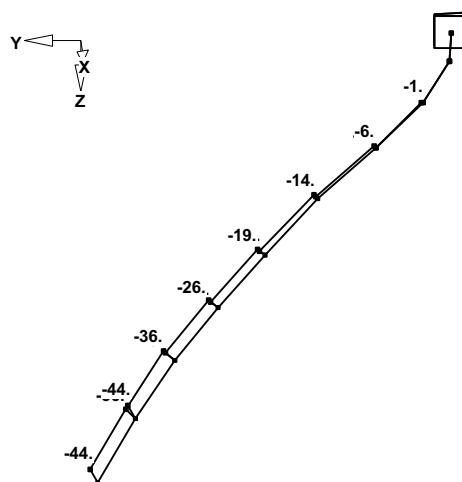
Abbildung 33: Belastung erster Ansatz



**Abbildung 34: Normalkräfte und Verformung aus Belastung**

Es ergibt sich eine gute Normalkraftverteilung. An der Verformungsfigur erkennt man aber ein für die Falte untypisches Verhalten. Eine solche Absenkung der Falte im oberen Bereich ist im physischen Modell jedoch nicht zu erkennen.

Um das Tragverhalten genauer abzubilden, wurde der Normalkraftverlauf im verfeinerten Modell unter der 0,3 fachen Last nach Th. 2. O. berechnet. Er ergibt sich wie in Abb. 35 zu sehen ist.



Max Nt 0.02, Min Nt -43.71 N

**Abbildung 35: Normalkräfte im steilen Lastpfad welcher dem Stab 20 im groben Stabwerksmodell entspricht**

Man erkennt, dass nahezu keine Belastung im oberen Bereich des Stabes vorhanden ist. Zum Überprüfen der Tragfähigkeit des Drucklastpfades wurden Stabnormalkräfte aufgebracht die diese Normalkräfte in den Stäben erzeugen. Anschließend wurden diese Kräfte so faktorisiert, dass die maximale Beanspruchung im Stab bei einer Berechnung nach 2. Ordnung auch der Beanspruchung aus dem vereinfachten Stabwerksmodell entspricht.

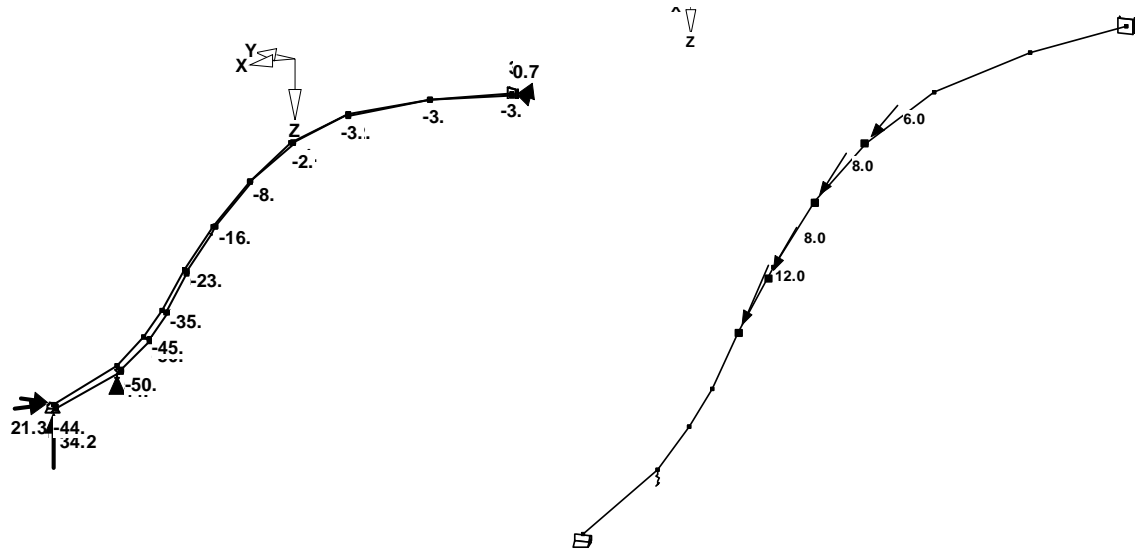
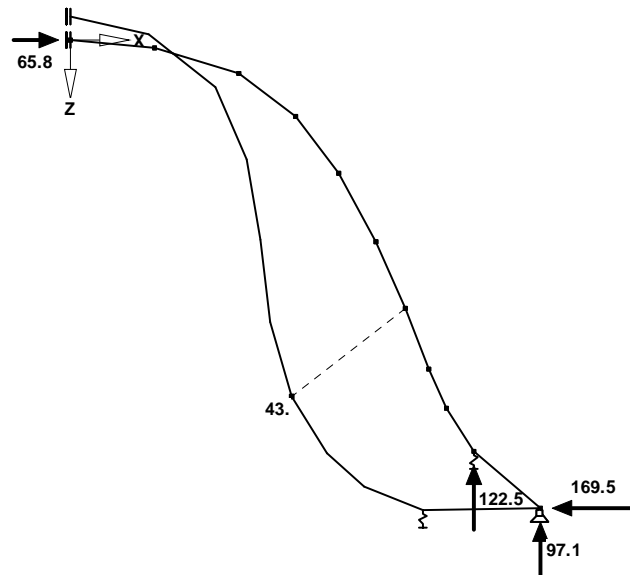


Abbildung 36: Normalkräfte unter einfacher Belastung

### 7.3 Ergebnis

In Abb. 37 ist die Verformung des Stabes unter einer Beanspruchung wie sie in Abb. 37 dargestellt wurde gezeigt.

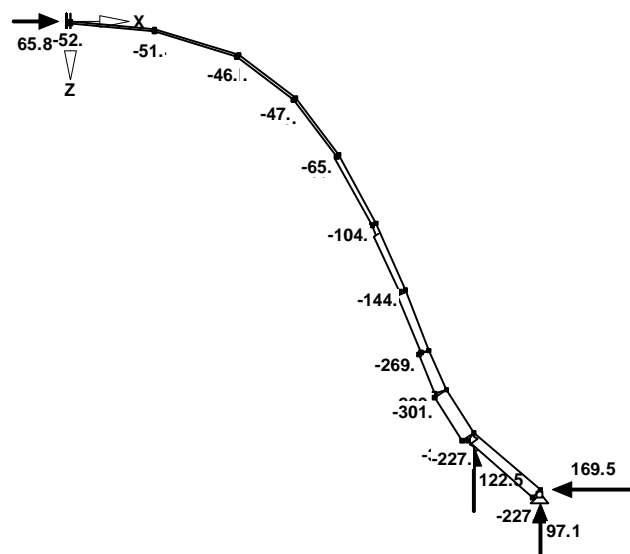


Max u: 43.02 mm

Faktor für Verschiebungen: 1

**Abbildung 37: LG8: Verformung unter 5,5- facher Belastung**

Abb. 39 zeigt die dazugehörigen Normalkräfte im Stab.



Mn N: -301.34 N

**Abbildung 38: Normalkräfte in den Druckstäben unter 5,5-facher Belastung**

Diese Verformungsfigur zeigt, dass die Falte sich zwar im Resttragfähigkeitsfall sehr stark verformt nicht aber ihre gesamte Form und damit ihre Tragfähigkeit verliert.

Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Falte ihre Tragfähigkeit über 24h behält und dass so auch die gesamte Resttragfähigkeit über 24 h bestehen wird.

### 7.3.1 Vergleich über Knickberechnung

Betrachtet man die Tragfähigkeit über das Knicken, so liegt die zweite Eigenform der Versagensform am nächsten. Die Knicklänge beträgt  $l/2$ .

Bei dieser Näherung ist eine Ausnutzung von:

$$N_{ki} = \left( \frac{\pi}{s_k} \right)^2 * E * I = 0,265 \text{ kN} \quad \text{Ausnutzung 99\%}$$

Knicklänge	$s_k$	$= 0,5 * 24 \text{ cm} = 12 \text{ cm}$
E-Modul nach 0h	$E$	$= 0,42 \text{ kN/cm}^2$
Trägheitsmoment	$I = b * h^3 / 12$	$= 9,20 \text{ cm}^4$
Breite = 5,4mm * 100mm / 300mm	$b$	$= 0,18 \text{ cm}$
Höhe	$h$	$= 8,50 \text{ cm}$

vorhanden.



## 8 Genauere Berechnung des Stabes 20, Belastungsdauer 48 h

Die Berechnung des Stabes 20 bei einer Belastungsdauer von 48h erfolgt nach dem gleichen Schema wie die Berechnung bei einer Belastungsdauer von 24 h aber unter geänderten Materialeigenschaften.

### 8.1 Material und Querschnitte

Die Biegesteifigkeit ist die des gebrochenen Glases.

Der E-Modul aus den Versuchen wurde so angepasst, dass der zu berechnende Einzelstab die doppelte Breite seiner Einflussbreite aufweisen kann.

$$E = 0,333 \text{ kN/cm}^2 \cdot 5,4\text{mm}/300\text{mm}/2 = 0,003 \text{ kN/cm}^2$$

Die Querschnitte wurden wie in der Berechnung bei einer Belastungsdauer von 24 h angenommen.

### 8.2 Belastung

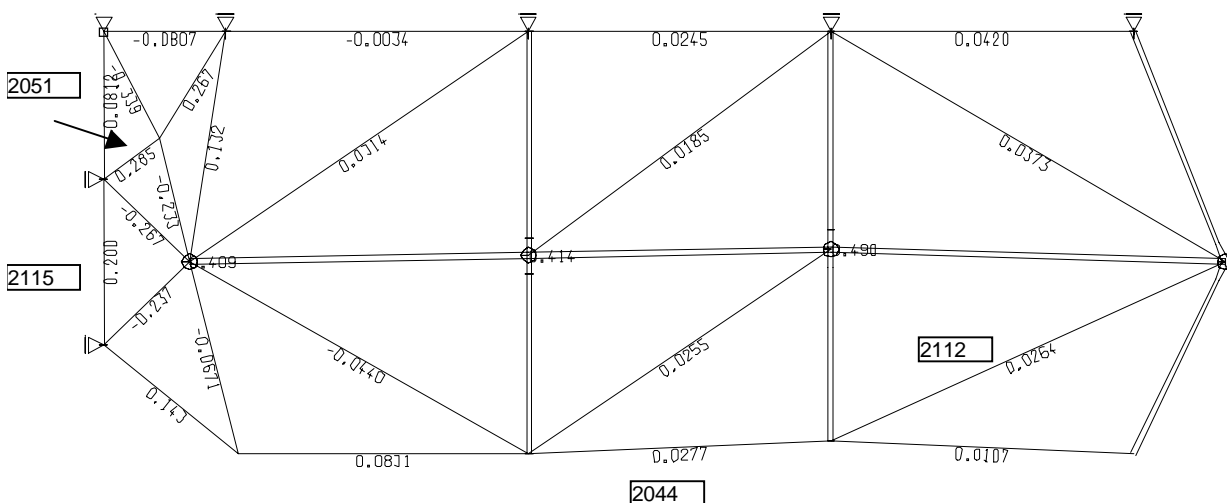


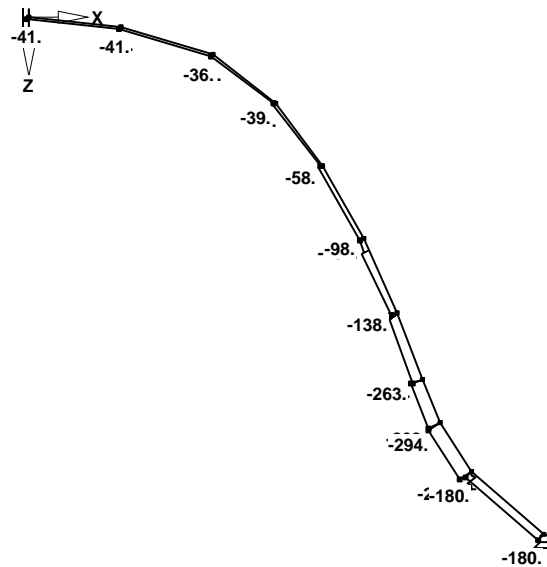
Abbildung 39: Kräfte in den Fachwerkstäben nach 48 h

An Abbildung 39 ist zu erkennen, dass sich an den Kräften zwischen 24 h und 48 h nur unwesentlich verändert haben. Zur rechnerischen Überprüfung der Tragfähigkeit wird nun grundsätzlich die gleiche Berechnung wie für 48 h angestellt. Es wird lediglich der E-Modul angepasst.

Sollten die Verformungen im Ersatzstab auch bei einem E-Modul für 48 h nicht so groß sein, dass ein Versagen der Welle zu erwarten ist, so kann von einer Resttragfähigkeit für eine Dauer von 48 h ausgegangen werden.

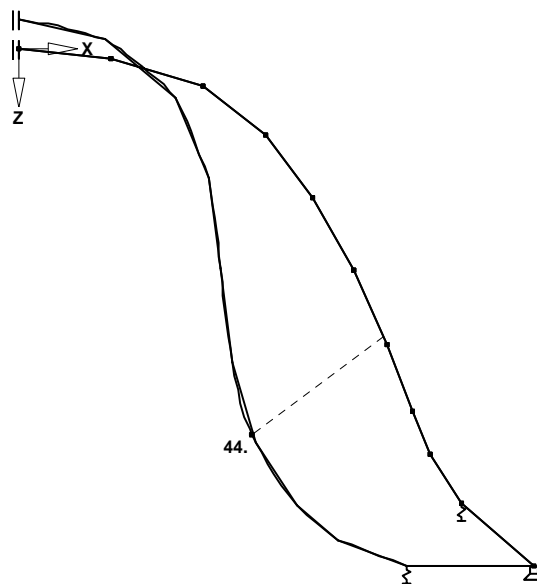
### 8.3 Ergebnis:

In Abb. 40 und 41 sind die Ergebnisse der Berechnung für eine Belastungsdauer von 48h dargestellt.



$M_N N: -293.74 \text{ N}$

**Abbildung 40: Normalkraft  $N$  aus 5,5 fache Belastung**



$\text{Max } u: 44.44 \text{ mm}$

Faktor für Verschiebungen: 1

**Abbildung 41: Verformung  $u$  aus 5,5-facher Belastung bei einer Belastungsdauer von 48h, Blick in  $y$**

In der Grafik ist zu erkennen, dass eine deutliche Verformung vorhanden ist. Es ist aber nicht von einem totalen Versagen der Falte auszugehen.

Damit kann auch für einen Zeitraum von 48 h davon ausgegangen werden, dass die Resttragfähigkeit gewährleistet ist.

Es zeichnet sich ab, dass der dritte Knoten von unten bei weiterer Belastung ebenfalls weiter nach unten wandern wird. Durch seine räumliche Lage kann dieser aber nicht mehr vom Zugstab gestützt werden. Der Knoten wird nach unten hängen und die Gesamthöhe der Falte wird stark abnehmen.

Ob sich in der Folge des Versagens des Lastpfades eine neue Tragwirkung einstellt oder ob die Resttragfähigkeit ist nicht mehr gewährleistet wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.



# Anhang 8

## Lebenslauf

Mark Fahlbusch, verheiratet, 2 Kinder

4. September 1970	in Mainz geboren. Staatsangehörigkeit: deutsch / US-amerikanisch
1978 bis 1990	Schulbesuch Freie Waldorfschule Darmstadt Abschluss mit der allgemeinen Hochschulreife.
1990 bis 1992	Zivildienst Diakoniekrankenhaus, Freiburg (Breisgau)
1992	Baupraktikum Südwestdeutsche Baugesellschaft Freiburg (Breisgau) Dauer: 6 Monate
WS 92/93	Physikstudium Universität Freiburg
SS 1993	Vorlesungen für Bauingenieure als Gasthörer Technische Universität Darmstadt
1993 bis 1999	Bauingenieurstudium Vertiefungsfächer: Massivbau und Geotechnik Hauptvertiefungsfach: Statik, Vertiefer und Diplomarbeit bei Prof. Dr. Ing. Wörner im Glasbau
1999 bis 2000	Tätigkeit als Statiker, im Stahl und Glasbau Mero Systeme GmbH & Co. KG, Würzburg
2000 bis 2005	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Technische Universität Darmstadt Fachbereich Architektur Fachgebiet Entwerfen und Tragwerksentwicklung Prof. Dr.-Ing. Dietger Weischede
Seit August 2005	Projektleiter in der Tragwerksplanung Bollinger und Grohmann GmbH Frankfurt am Main